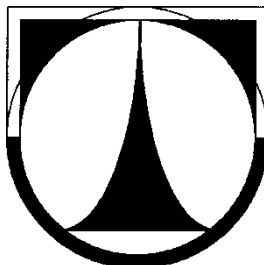


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
Katedra vozidel a motorů



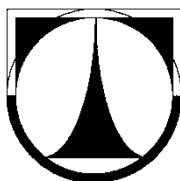
ZPŮSOBY MĚŘENÍ HLUKU SPALOVÁNÍ
MEANS OF MEASURING COMBUSTION NOISE

Bakalářská práce

MARTIN KOPECKÝ

Liberec 2013

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
Katedra vozidel a motorů



Obor B2341 – Strojírenství
Zaměření - Dopravní stroje a zařízení

ZPŮSOBY MĚŘENÍ HLUKU SPALOVÁNÍ
MEANS OF MEASURING COMBUSTION NOISE

Bakalářská práce

KVM – BP – 291

MARTIN KOPECKÝ

Vedoucí bakalářská práce: **Ing. Jan Novák, Ph.D.**
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Dr. Ing. Pavel Němeček**

Počet stran: 92
Počet obrázků: 45
Počet příloh: 2

Květen 2013

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 22. května 2013

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu práce Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za jeho podporu a cenné rady, které mi věnoval při tvorbě této práce. Další poděkování patří panu Ing. Aleši Dittrichovi, panu Ing. Petru Starému a panu Ing. Michaelu Fenklovi za poskytnutá data z měření. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také všem ostatním, kteří mi se zpracováním této práce pomohli.

Název

ZPŮSOBY MĚŘENÍ HLUKU SPALOVÁNÍ

Anotace

Bakalářská práce se zabývá způsoby měření hluku pístových motorů při spalování paliva. Práce je členěna na několik oddělených dílů.

Úvodní část se věnuje základním teoretickým pojmům souvisejícím se zvukem a hlukem a obsahuje příslušné definice.

Poté navazuje část vymezující hlavní zdroje hluku v našem okolí a popisuje jejich negativní účinky na okolí kolem nás a na člověka samotného. Tato část práce současně obsahuje výčet hlavních zdrojů hluku ve spalovacím motoru.

Nejobsáhlejší částí práce je pak část následující, která se věnuje možným způsobům měření hluku motoru při spalování paliva, vhodným zařízením k měření hluku při spalování a možnostem zpracování jimi naměřených hodnot.

Poslední částí je porovnání vyhodnocení reálných hodnot měření hluku spalování, které bylo provedeno v laboratoři Katedry vozidel a motorů Technické Univerzity v Liberci na dvou různých motorech.

Cílem práce je tedy podat ucelený přehled o nejrozšířenějších možnostech měření hluku spalování a na základě výsledků měření jednotlivých motorů zhodnotit jejich hlukové vlastnosti a navrhnout některé možnosti ke snížení hluku.

Klíčová slova

Zvuk, hluk, spalování, měření hluku, zvukoměr, mikrofón, snímač

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

Dokončeno:

Archivní označení zprávy:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů
2013

Title

MEANS OF MEASURING COMBUSTION NOISE

Annotation

The Bachelor's thesis is dealing with means of measuring noise in piston engines during fuel combustion.

The thesis is divided into several separate parts.

The opening part deals with basic theoretical terms related with sound and noise and it contains appropriate definitions.

The following part specifies the main sources of noise in our environment and describes their negative effect on our surroundings and on a man himself. This part of the thesis also contains the list of the main sources of noise in a combustion engine.

The next and most extensive part deals with possible means of measuring noise during fuel combustion, the proper apparatus for measuring, and possibilities of processing the measured data.

The last part is a comparison of real gathered data of combustion noise measuring, which was performed in a Department of Vehicles and Engines of Technical University of Liberec upon the two different engines.

The aim of the thesis is therefore to enforce a coherent overview of the most extended means of measuring combustion noise and on the base of noise combustion measuring results of individual engines assess their noise qualities and suggest a possible means of reducing the noise.

Key words

Sound, noise, combustion, measuring noise, sound level meter, microphone, sensor

Obsah

Seznam použitých symbolů a jednotek.....	9
Úvod.....	10
1. Vymezení základních pojmů	12
1.1. Zvuk	12
1.2. Hluk.....	13
1.3. Vibrace.....	13
2. Základní akustické veličiny, hladiny akustických veličin	14
2.1. Hladina akustické veličiny.....	14
2.2. Akustický tlak	14
2.3. Akustická rychlost.....	15
2.4. Rychlost zvuku ve vzduchu	16
2.5. Akustický výkon.....	16
2.6. Intenzita zvuku	17
3. Zdroje a negativní účinky hluku a vibrací	19
3.1. Zdroje hluku	19
3.1.1. Vnější hluk vozidel	19
3.1.2. Vnitřní hluk vozidel.....	20
3.2. Negativní účinky hluku	20
3.3. Zdroje vibrací	21
3.4. Negativní účinky vibrací.....	21
4. Hluk spalovacích motorů	22
4.1. Hluk vytvořený termodynamickým cyklem	23
4.2. Hluk od proudění plynů a kapalin	23
4.3. Hluk ostatních částí motoru.....	24
5. Měření hluku.....	25
5.1. Akustické podmínky při měření hluku.....	25
5.2. Volba metody měření hluku	26
5.3. Metody měření hluku.....	26
5.3.1. Měření hladiny akustického tlaku	26
5.3.2. Měření hladiny akustické intenzity.....	27
5.3.3. Měření akustického výkonu	28
5.3.3.1. Metoda měření akustického tlaku.....	28
5.3.3.2. Metoda měření akustické intenzity	29
5.4. Zhodnocení měřících metod	31
6. Zařízení na měření akustických veličin	32
6.1. Zvukoměry	32
6.1.1. Mikrofon	33

6.1.2.	Váhové filtry	35
6.1.3.	Zesilovač, efektovací obvod, zobrazovací jednotka.....	36
6.1.4.	Zvukoměr B&K 2270	37
6.2.	Intenzitní sondy	38
6.3.	Kalibrace zařízení na měření akustických veličin	40
7.	Metody zpracování signálu	41
7.1.	Analýza signálu v časové oblasti zvuku.....	41
7.2.	Analýza signálu ve frekvenční oblasti zvuku	41
7.3.	Filtrace signálu	42
7.3.1.	Synchronní filtrace signálu	42
7.4.	Vlnková transformace signálu.....	43
7.5.	Vyhodnocování signálů.....	44
8.	Měření hluku motoru při spalování.....	46
8.1.	Metody měření hluku spalování	46
8.1.1.	Snímače tlaku	46
8.1.2.	Snímač klikového hřídele	49
8.1.3.	Zařízení pro zpracování dat.....	50
8.1.4.	Zpracování dat.....	50
9.	Vlastní měření.....	52
9.1.	Postup měření.....	52
9.2.	Motor ŠKODA 1.2 HTP	54
9.2.1.	Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách	56
9.2.2.	Měření hluku spalování při 5000 otáčkách a různém zatížení.....	57
9.2.3.	Měření hluku spalování při 3000 otáčkách a různém zatížení	58
9.2.4.	Měření hluku spalování při 2000 otáčkách a různém zatížení	59
9.2.5.	Zhodnocení motoru ŠKODA 1.2 HTP.....	60
9.3.	Motor ZETOR Z 1505	61
9.3.1.	Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách	63
9.3.2.	Měření hluku spalování při 2200 otáčkách a různém zatížení	64
9.3.3.	Měření hluku spalování při 1480 otáčkách a různém zatížení	65
9.3.4.	Zhodnocení motoru ZETOR Z1505.....	66
10.	Závěr.....	68
	Seznam zdrojů	69
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam rovnic.....	72
	Seznam tabulek.....	72
	Přílohy	73

Seznam použitých symbolů a jednotek

a	Pohltivost stěny dozvukové komory	[dB]
C	Elektrická kapacita	[F]
c, c_0	Rychlost zvuku	[m.s ⁻¹]
F, F_x, F_y	Síla	[N]
f_c	Střed propustného pásma	[Hz]
f_h	Horní frekvence	[Hz]
f_s	Spodní frekvence	[Hz]
I	Intenzita zvuku	[W.m ⁻²]
I_n	Normálová intenzita zvuku	[W.m ⁻²]
K_p	Piezoelektrická konstanta	[C.N ⁻¹]
L	Hladina akustické veličiny	[dB]
L_I	Hladina intenzity zvuku	[dB]
L_p	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_v	Hladina akustické rychlosti	[dB]
L_w	Hladina akustického výkonu	[dB]
n	Jednotkový vektor	[-]
p	Tlak, akustický tlak	[Pa]
p_{ef}	Efektivní akustický tlak	[Pa]
Q	Elektrický náboj	[C]
S	Plocha	[m ²]
t	Teplota	[°C]
T	Čas	[s]
U	Elektrické napětí	[V]
v, v_a	Rychlost, akustická rychlost	[m.s ⁻¹]
v_{ef}	Efektivní akustická rychlost	[m.s ⁻¹]
W	Výkon, akustický výkon	[W]
x	Akustická veličina	[-]
ρ, ρ_0	Hustota	[kg.m ⁻³]

Úvod

Hlučnost našeho okolí narůstá společně s lidskou činností a výskytem strojů. V poslední době roste hluk zejména s nárůstem počtu automobilů v dopravě, a to nejen ve velkých městech jako je Praha, Brno a další, ale i v okolí velkých silničních tahů s velkou koncentrací automobilů. Proto je v dnešní době silniční doprava jedním z největších zdrojů hluku obecně.

Hluk je a bude přítomen při každé lidské činnosti, a proto je mu stále věnována patřičná pozornost. V dnešní době je dobře známo, co vše hluk způsobuje. Jeho nejhorší vlastností jsou účinky jak na samotné životní prostředí, tak i na lidské zdraví. Hluk má vliv zejména na lidské chování, pozornost, rychlost a přesnost, v neposlední řadě způsobuje např. i bolesti hlavy. V nejhorším případě může dojít i k poškození samotného sluchového orgánu. Proto jsou v dnešní době stanovené limitní hodnoty hluku, které nesmějí být překračovány, a to nejen v dopravě jako celku, ale i pro každé samostatné vozidlo. Žádné vozidlo nesmí tyto limity překračovat, a proto existují hlukové zkoušky vozidel. Každé vozidlo musí těmito kontrolami projít dříve, než bude schváleno pro provoz na pozemních komunikacích.

Měření hluku probíhá mnoha způsoby - jak v různých režimech jízdy vozidla, tak i na stojícím vozidle. Zdrojů hluku automobilů je několik. Je to například výfuková soustava, kontakt pneumatik s vozovkou a při vysokých rychlostech i okolní vzduch proudící okolo vozidla. Největším zdrojem hluku je ale samotná hnací soustava vozidla, a to především převodovka a motor.

Obsahem studijní a experimentální práce je ucelený přehled nejčastějších možností měření hluku, které lze v současné době využít a zároveň tyto metody porovnává a hodnotí.

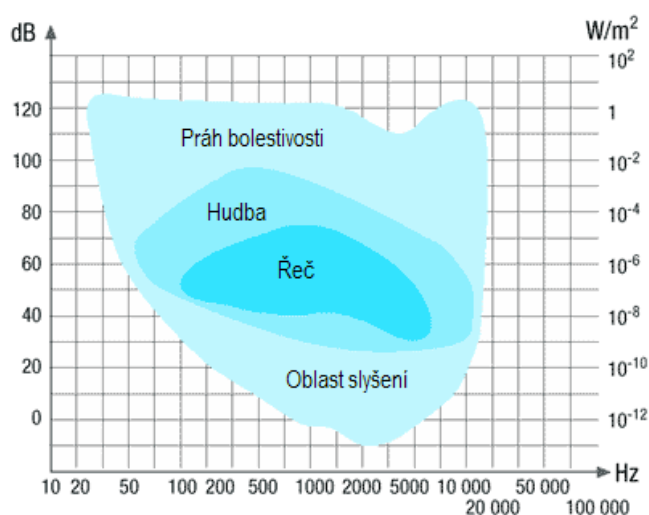
Hlavním cílem práce je pak především představit metodu, která se využívá k měření hluku spalování, a na metodu se zaměřit podrobněji. Tato metoda je nazývána jako vysokotlaká indikace. V posledních letech se na základě vlivu vývoje měřicí techniky tato metoda stala důležitým analytickým nástrojem využívaným k optimalizaci spalovacího procesu. S jednodušší verzí této metody pracoval už v 19. století Nicolaus August Otto. Náplní práce je tedy provést podrobný rozbor vysokotlaké indikace, seznámit veřejnost s možnostmi jak postupovat při měření, uvést všechna zařízení a příslušenství, která se k měření používají, a zmínit faktory, které měření zásadně ovlivňují. Součástí práce je popis, jakým způsobem lze měření provést v laboratoři Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci.

Důležitým a podstatným oddílem práce, který vychází z výše nastíněného tématu, je pak její samotná praktická část - experimentální měření hluku spalování s cílem zjištění množství hluku spalování různých motorů a porovnání jednotlivých výsledků měření. Tato část práce bohužel nemohla být plně realizována, jelikož v období zpracovávání práce docházelo ke stěhování laboratoře indikační techniky Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. Z tohoto důvodu byla pro potřeby zpracování bakalářské práce využita dostupná data, která byla získána při měření vysokotlakou indikací při dřívějších měřeních. Tato skutečnost nemá však vliv na závěry a vypovídající hodnotu této práce.

1. Vymezení základních pojmů

1.1. Zvuk

Zvuk je definován jako podélné mechanické vlnění v látkovém prostředí, a to v prostředí kapalném nebo plynném. Toto vlnění je schopné vyvolat sluchový vjem. Frekvence vlnění, kterou je schopné zachytit lidské ucho, bývá velmi často odlišná, ale je přibližně v intervalu 16 [Hz] – 20 000 [Hz]. Mechanické vlnění ležící v uvedeném rozmezí je schopné lidské ucho přijmout pouze tehdy, když intenzita zvuku převyšuje minimální hodnotu, tzv. práh slyšitelnosti. Naopak zvuky o velké intenzitě vyvolávají už jen pocity bolesti, překročí tedy tzv. práh bolestivosti. Obrázek 1 zobrazuje přibližné sluchové možnosti lidského ucha. (1)



Obrázek 1 Zvukové hladiny (25)

Existuje ale také mechanické vlnění mimo tento rozsah, které sluchový vjem nevyvolává, a to jak pod hranicí 16 [Hz], tak také nad hranicí 20 000 [Hz]. Frekvenci, která leží pod hranicí 16 [Hz], má infrazvuk. Naopak frekvenci, která leží nad hranicí 20 [kHz], využívá ultrazvuk. Ději spojenými se vznikem zvuku, jeho šířením a vnímáním se zabývá rozsáhlý vědní obor nazývaný akustika.

1.2. Hluk

Obecně vzato lze považovat hluk za nežádoucí zvuk, který způsobuje rušivé nebo nepříjemné vjemy či poškozuje lidské zdraví. Účinky hluku na člověka jsou hodnoceny jak dobou trvání, tak i jeho intenzitou. Nicméně vymezení pojmu hluk je individuální záležitostí, neboť každé lidské ucho není stejně citlivé vůči různým zdrojům hluku.

Pojem hluk definuje Zákon o ochraně veřejného zdraví.

1.3. Vibrace

S pojmem hluk souvisí také pojem vibrace. Jednoduše lze vibrace definovat jako mechanické kmitání (vlnění) v tuhých látkách, které není omezeno frekvenčním rozsahem; lze je rozdělit na dva typy - chvění pružných těles a kmitání tuhých těles, která kmitají kolem rovnovážné polohy. Při sledování vibrací se zaměřujeme zejména na místo působení, směr působení a frekvenci. Rozdělit vibrace, které působí na člověka, lze na vibrace působící celkově a vibrace působící pouze na jedno místo. Pojem vibrace definuje Zákon o ochraně veřejného zdraví

2. Základní akustické veličiny, hladiny akustických veličin

Akustické veličiny, tedy spíše hladiny akustických veličin plynou z Weber-Fechnerova zákona, který říká, že akustické veličiny, které se mění řadou geometrickou, vnímá lidské ucho řadou aritmetickou, přičemž násobky akustického signálu jsou uchem vnímány jako přírůstky. Pro převod geometrické řady na aritmetickou využíváme funkce logaritmus. Díky této funkci získáme také v grafickém znázornění přehlednější výsledky, neboť se hodnoty akustických veličin mění v obrovském rozsahu. Jednotkou hladin akustických veličin je 1 decibel [dB]. (2)

2.1. Hladina akustické veličiny

Pro hladinu akustické veličiny platí základní vztah:

$$L = \log \frac{x}{x_0} \text{ [B]}.$$

1 Výpočet hladiny akustické veličiny

Z důvodu, že Bel [B] je jednotka velmi malá, používá se decibel [dB], pak je přepis rovnice následující:

$$L = 10 \log \frac{x}{x_0} \text{ [dB]},$$

2 Výpočet hladiny akustické veličiny

kde

L [B] - hladina akustické veličiny,

x [-] - příslušná akustická veličina,

x_0 [-] - vztažná hodnota akustické veličiny.

2.2. Akustický tlak

Vlivem kmitání částic prostředí dojde ke změně tlaku oproti tlaku atmosférickému. Změnu pak označujeme jako akustický tlak, značíme písmenem p a její jednotkou je Pascal [Pa]. Akustický tlak je přímo měřitelný a pohybuje se v rozmezí od $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] (práh slyšitelnosti) do hodnoty $2 \cdot 10^2$ [Pa] (práh bolestivosti). Pro porovnání hodnota

barometrického tlaku se pohybuje okolo 10^5 [Pa]. S pojmem akustický tlak také přímo souvisí pojem hladina akustického tlaku. Hladinu akustického tlaku definuje vztah:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_o^2} = 20 \log \frac{p}{p_o} \text{ [dB]},$$

3 Výpočet hladiny akustického tlaku

kde

p_o [Pa] - vztažná (referenční) hodnota akustického tlaku,

p [Pa] - příslušná hodnota akustického tlaku.

Vztažná hodnota $L_p = 0$ [dB] odpovídá prahu slyšitelnosti a při této hodnotě je velikost akustického tlaku rovna $p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]. Naopak hodnota $L_p = 130$ [dB] odpovídá prahu bolestivosti. (2)

2.3. Akustická rychlost

Akustickou rychlost značíme písmenem v , jednotkou je metr za sekundu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Akustická rychlost odpovídá rychlosti, kterou kmitají jednotlivé částice v prostředí za působení akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Tato rychlost je nepřímo měřitelná a její hodnoty se pohybují v rozmezí od $5 \cdot 10^{-8}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - práh slyšitelnosti – do hodnoty okolo $1,6 \cdot 10^{-1}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - práh bolestivosti. Obdobně jako s akustickým tlakem i s akustickou rychlostí souvisí hladina akustické rychlosti definovaná takto:

$$L_v = 10 \log \frac{v^2}{v_o^2} = 20 \log \frac{v}{v_o} \text{ [dB]},$$

4 Výpočet hladiny akustické rychlosti

kde

v_o [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - vztažná (referenční) hodnota akustické rychlosti,

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] - příslušná hodnota akustické rychlosti.

Vztažná hodnota akustické rychlosti $v_o = 5 \cdot 10^{-8}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

2.4. Rychlost zvuku ve vzduchu

Rychlost zvuku odpovídá rychlosti, jakou se zvukové vlny šíří prostředím. Rychlost zvuku se značí písmenem c , jednotka je metr za sekundu [m.s^{-1}]. Pro naše účely se tímto pojmem myslí rychlost zvuku ve vzduchu, která závisí na atmosférických podmínkách. Největší vliv na její hodnotu má teplota vzduchu. Ze vzorce pro rychlost zvuku v ideálním plynu vyplývá, že pro rychlost zvuku v suchém vzduchu platí následující vztah:

$$c = 331,82 + 0,607 t \text{ [m.s}^{-1}\text{]},$$

5 Výpočet rychlosti zvuku

kde

t [°C] - teplota vzduchu.

Například tedy při teplotě 20 [°C] je rychlost zvuku ve vzduchu $\approx 344 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$.

2.5. Akustický výkon

Akustický výkon značíme písmenem W a jednotkou je Watt [W]. Akustický výkon je měřítkem celkové akustické energie, která projde určitou plochou za určitý čas. Je základní a nejdůležitější veličinou popisující akustické vlastnosti zdroje zvuku. Obecně je výkon definován jako součin akustické rychlosti v a působící síly F . Síla F je úměrná součinu akustického tlaku p a plochy S (2). Pak je definice akustického výkonu následující:

$$W = Fv = pSv \text{ [W]},$$

6 Výpočet akustického výkonu

kde

p [Pa] - akustický tlak,

S [m^2] - vztažná plocha,

v [m.s^{-1}] - akustická rychlost.

Hladinu akustického výkonu reprezentuje vztah:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ [dB]},$$

7 Výpočet hladiny akustického výkonu

kde

W_0 [W] - vztažná (referenční) hodnota akustického výkonu,

W [W] - příslušná hodnota akustického výkonu.

Vztažná hodnota akustického výkonu $W_0 = 10^{-12}$ [W].

2.6. Intenzita zvuku

Intenzitu zvuku je vektorová veličina, značíme ji písmenem I a jednotka je Watt na čtverečný metr $[W.m^{-2}]$. Intenzita zvuku je měřítkem akustické energie procházející jednotkou plochy. Intenzita zvuku reprezentuje výkon vyzářený do prostoru v podobě akustické vlny vztažený na jednotku plochy vlnoplochy procházející daným bodem. Intenzitu zvuku lze definovat několika způsoby, jedním z nich je např.:

$$I = \frac{W}{S} [W.m^{-2}],$$

8 Výpočet intenzity zvuku

kde

W [W] - vyzářený výkon,

S $[m^2]$ - vztažná plocha.

Intenzitu zvuku lze také vyjádřit jako součin efektivního akustického tlaku a efektivní hodnoty akustické rychlosti.

$$I = \frac{Fv}{S} = p v = p_{ef} v_{ef} [W.m^{-2}],$$

9 Výpočet intenzity zvuku

kde

F [N] - síla

v $[m.s^{-1}]$ - akustické rychlost,

p [Pa] - akustický tlak,

v_{ef} $[m.s^{-1}]$ - efektivní hodnota akustické rychlosti,

p_{ef} [Pa] - efektivní hodnota akustického tlaku.

Výsledný vztah pro hladinu intenzity zvuku pak lze zapsat v tomto tvaru:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]},$$

10 Výpočet hladiny intenzity zvuku

kde

I_0 [W.m⁻²] - vztažná (referenční) hodnota intenzity zvuku,

I [W.m⁻²] - příslušná hodnota intenzity zvuku.

Vztažná hodnota intenzity zvuku $I_0 = 10^{-12}$ [W.m⁻²]. (2)

3. Zdroje a negativní účinky hluku a vibrací

3.1. Zdroje hluku

Jak bylo již v úvodu napsáno, hluk je spojen s každou lidskou činností. Zdrojů hluku je velmi mnoho, největším zdrojem hluku je doprava, průmysl, ale i lidé samotní. V dalším pokračování se ale tato práce zaměřuje zejména na hluk spojený s provozem motorových vozidel. Obecně velikost hluku jednotlivých motorových vozidel závisí na mnoha faktorech.

Lze říci, že nejvýznamnějšími faktory ovlivňující hlučnost jsou mechanický výkon motoru a příslušná konstrukce motorového vozidla. Neméně pak záleží zejména na rychlosti vozidla, technickém stavu vozidla a způsobu používání a ovládání vozidla. Z dalších faktorů jsou to pak technický stav vozovky, povětrnostní podmínky a dále také okolní prostředí. Je zcela jasné, že v zastavbové oblasti bude hluk jiný než ve volném prostoru.

U motorových vozidel lze rozdělit hluk na dva druhy, a to na hluk vnější, který vozidlo vytváří mimo svou konstrukci, a hluk vnitřní, který vzniká přímo ve vlastní konstrukci vozidla.

3.1.1. Vnější hluk vozidel

Vnější hlukem je ovlivněn veškerý okolní prostor pohybujícího se vozidla. Vnější hluk vozidla se skládá z jednotlivých zdrojů hluku vznikajících ve vozidle. Mezi největší zdroj hluku ve vozidle patří motor, a to především hluk sání a výfuku při spalování. Obecně lze říci, že hluk motoru roste s jeho současně se vzrůstajícím výkonem. Neméně velkým činitelem je aerodynamický hluk, který způsobuje především vozidlo svým pohybem a který vzniká vnějším obtékáním vzduchu okolo vozidla. Čím je rychlost vozidla větší, tím roste i velikost hluku.

Dalším významným činitelem hluku je převodové ústrojí, a to zejména pohyb ozubených kol a řazení jednotlivých převodových stupňů. Nemalou měrou přispívá také hluk vznikající při kontaktu pneumatik s vozovkou. Obecně lze říci, že hluk z motoru převažuje při nižších rychlostech vozidla (do 50 km.h⁻¹), při vyšších rychlostech nad hlukem motoru převyšuje hluk pneumatik spolu s aerodynamickým hlukem.

Ve městech s velkým počtem křižovatek dochází k rychlému kolísání hladiny hluku, a to vlivem toho, jak vozidlo brzdí a opětovně se rozjíždí (3).

3.1.2. Vnitřní hluk vozidel

Vnitřní hluk působí pouze v uzavřeném prostoru vozidla, vnímá jej tedy pouze osádka vozidla, a je závislý na mnoha činitelích. Jsou jimi především vibrační vlastnosti nosné karosérie a akustické vlastnosti vnitřního prostoru samotného vozidla. Vnitřní hluk vozidla se může šířit dvěma způsoby, a to jako hluk šířený chvěním nebo hluk šířený vzduchem.

Hluk šířený chvěním vzniká působením proměnných sil na nosnou konstrukci a karosérii vozidla, které vlivem sil rozechvívají boční stěny vozidlového prostoru, čímž je vyzařován hluk do tohoto prostoru.

Druhý uvedený způsob vzniká šířením hluku od jednotlivých zdrojů hluku, jako je motor, převodovka atd. přes izolované stěny do vozidlového prostoru. Místem, ve kterém dochází k největšímu šíření hluku do prostoru pro cestující, je okolí řidičových nohou (3).

3.2. Negativní účinky hluku

K velkému hluku patří samozřejmě i jeho negativní účinky na okolní prostředí v místě jeho působení. V dnešní době plné spěchu a stresu si mnoho lidí vůbec neuvědomuje, jak rizikovým hluk je. Hluk velmi významně ovlivňuje zdravotní, resp. psychický stav člověka, především má vliv na udržení pozornosti, ale může způsobovat i depresi, agresivní chování, ztrátu koncentrace, únavu či nespavost. Nadměrná hluková zátěž má také za následek zvýšenou možnost vzniku srdečních onemocnění a nemocí krevního tlaku.

Asi největším negativním účinkem hluku na lidské tělo je možné a nenávratné poškození sluchu. K tomu může dojít už při velmi krátkodobém vystavení se hluku přesahujícímu 125 [dB] (pro představu je to poslech velmi hlasité hudby nebo např. start letadla ze vzdálenosti cca 100 m) nebo častému vystavení se hluku nad 85 [dB] (hluk nástrojů jako jsou motorové pily, vrtačky atd.). K poškození sluchu může dojít i při trvalém vystavení se hluku okolo hodnoty 70 [dB], což odpovídá podmínkám, které se objevují v okolí hlavních silnic a dálničních sítí (4).

3.3. Zdroje vibrací

Jelikož s hlukem souvisejí i vibrace, jak již bylo dříve zmíněno, jsou zdroje vibrací velmi podobné či téměř identické jako zdroje hluku. Jelikož se tato práce vibracemi zabývá pouze okrajově, tj. je spjata především s pojmem hluk, není třeba se o zdrojích vibrací obsáhleji rozepisovat.

3.4. Negativní účinky vibrací

Stejně jako hluk i vibrace působí negativně na své okolí v místě jejich působení. Jak velké jsou negativní účinky vibrací, závisí na intenzitě vibrací a délce jejich působení. Negativní účinky vibrací jsou podobné jako negativní účinky hluku. Jsou to tedy zejména příznaky projevující se jako únava, špatná pracovní výkonnost, nepozornost a další. I krátkodobé působení vibrací může vyvolat nepříznivé účinky.

4. Hluk spalovacích motorů

Motorová vozidla patří k významným zdrojům hluku v blízkém okolí člověka. Z tohoto důvodu jsou motorová vozidla pod dohledem Evropské hospodářské komise OSN¹ (EHK) a musí splňovat všechny předpisy a ustanovení, která EHK nařizuje. Tabulka 1 ukazuje vývoj limitních hodnot vnějšího hluku motorových vozidel s odstupem několika let.

Limitní hodnota hluku [dB]

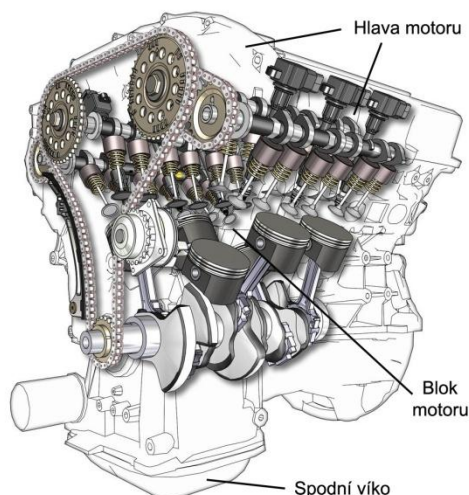
Rok	1970	1994	2007
Osobní vozidlo	82	77	74
Nákladní vozidlo	91	84	80

Tabulka 1 Limity max. povoleného vnějšího hluku silničních vozidel podle EHK (5)

Čím více se zvyšuje počet motorových vozidel se spalovacími motory, tím se stále zpřísňují předpisy pro jejich provozování, a proto jsou výrobci neustále nuceni hledat nové metody ke snižování hluku vozidel. Nadměrný hluk zároveň také snižuje konkurenceschopnost vozidla.

Spalovací motor je mechanická soustava, mechanický tepelný stroj několika na sobě závislých systémů sloučených do jednoho tělesa - bloku motoru. Spalovací motor můžeme rozdělit na tři základní části, a to hlavu motoru, blok motoru a spodní víko. Hlava a blok motoru jsou většinou masivní části z hliníkové slitiny, spodní víko je většinou výlisek z oceli. Všechny části jsou spojeny šrouby. Toto jsou tři největší části motoru co do velikosti vyzařování hluku. Je samozřejmé, že otáčky motoru a jeho zatížení mají největší vliv na výsledný hlukový projev spalovacího motoru. Na obrázku 2 je vyobrazen blok spalovacího motoru s vyznačením jeho hlavních částí.

¹ Organizace spojených národů.



Obrázek 2 Spalovací motor (23)

4.1. Hluk vytvořený termodynamickým cyklem

U spalovacích motorů s písty s vnitřním spalováním dojde v uzavřeném prostoru válců motoru k hoření paliva a tím i ke zvýšení tlaku a teploty v tomto místě. Nárůst tlaku a teploty ve válci je způsoben vznícením (u vznětových motorů), zažehnutím (u zážehových motorů) směsi odpovídajícího množství paliva a vzduchu. Při procesu rychlého nárůstu tlaku vzniká i nežádoucí hluk. Proces sání – komprese – expanze - výfuk se neustále opakuje a dochází tedy k neustálému vyzařování hluku.

4.2. Hluk od proudění plynů a kapalin

Další příčinou vzniku hluku je neustálené proudění plynných a kapalných látek v bloku motoru. Z kapalných látek je to chladicí kapalina a olej k mazání motoru, ale vzhledem k jejich rychlosti proudění je hluk od těchto látek v podstatě zanedbatelný. Daleko většími zdroji hluku jsou výfukové plyny proudící do výfukového potrubí a vzduch nasávaný do válců. Zdroji hluku jsou tedy části motoru, ve kterých neustále proudí látky, zejména místa s intenzivní změnou rychlosti (6).

4.3. Hluk ostatních částí motoru

Blok motoru se skládá z mnoha částí, které jsou dalšími zdroji nežádoucího hluku. Vzájemné působení především kovových součástí při běhu motoru způsobuje vibrace, které jsou do prostředí vyzářeny jako hluk. Zdroji takového hluku ve spalovacím motoru jsou kliková skříň, blok válců, výfukové potrubí, pohyb jednotlivých ventilů a další příslušenství motoru, jako jsou olejové či palivové čerpadlo, ložiska, vstřikovací jednotky atd. Nemalý vliv na velikost hluku mají také ventilové rozvody, a proto dochází k vymezování vůlí ventilového rozvodu, které vede ke snižování hluku.

Spolu s motorovou částí souvisí i část převodová. Největšími zdroji hluku jsou převodovka, rozvodovka, spojka. Z těchto částí jsou to především ložiska, ozubená kola a další.

Po určité době běhu motoru dochází ke zvýšení teploty provozních kapalin a celého bloku motoru. Dochází k tepelné roztažnosti jednotlivých částí motoru a tím také ke zmenšování vůlí, klesá tedy i celkový hluk motoru. Naopak při určitém časovém opotřebení součástí motoru dochází ke zvětšování vůlí a tím hluk vydávaný motorem opět narůstá (6).

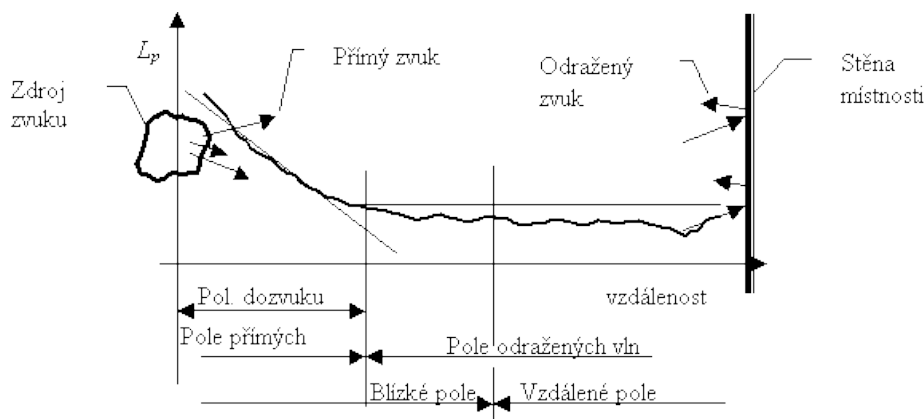
5. Měření hluku

K řešení problémů spojených s hlukem je dnes z velké části využívána výpočetní technika. Vzhledem k velké složitosti modelování, kdy je nutno především vytvořit přesný model objektu, který zahrnuje všechny podstatné zdroje hluku, jsou stále preferovány experimentální práce podpořené rychlým vývojem metod měření. Při zpracování signálu z měření se opět hojně využívá možnosti využití výpočetní techniky.

5.1. Akustické podmínky při měření hluku

„Při šíření zvukových vln ze zdroje zvuku můžeme rozeznat několik oblastí se specifickými parametry zvuku. Ve velmi blízkém okolí zdroje zvuku, jedná se o vzdálenost řádově rovné vlnové délce zvuku, neexistuje jednoduchá závislost mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. Pokud budeme tedy chtít měřit hluk v tomto poli, je nutné současně zjišťovat jak akustický tlak, tak i akustickou rychlost a z jejich násobku stanovit velikost akustické intenzity. Tato oblast se nazývá blízkým polem zvuku.“ (7)

Dále od zdroje hluku je pole, které se nazývá vzdálené pole. V tomto poli již existuje jednoduchý vztah mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí a stačí měřit pouze jednu z těchto dvou veličin. Pokud budeme tedy sledovat velikost hluku ve vzdáleném poli, zjistíme, že se zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje hluku se hladina akustického tlaku směrem od zdroje zvuku snižuje vždy o 3 [dB]. *„Při překročení určité vzdálenosti od zdroje zůstává však její hodnota stále přibližně stejná. Je to dáno tím, že mikrofon nejdříve měří především hluk přicházející ze zdroje, později i odrazy od stěn a dalších předmětů v místnosti. Tato vzdálenost se nazývá poloměrem dozvuku a je závislá především na parametrech prostoru, v němž měříme.“ (7)* Je zde závislost především na objemu místnosti, ploše stěn v místnosti, tvaru povrchu či koeficientu odrazivosti. Blíže zdroji než poloměr dozvuku je pole volné, za ním je pole odražených vln neboli difúzní pole, jak ukazuje následující obrázek 3.



Obrázek 3 Pole přímých a odražených vln (7)

5.2. Volba metody měření hluku

„Při volbě vhodné měřicí metody pro měření hluku je nutno uvažovat, zda se nacházíme v poli přímých nebo odražených vln a zda v tomto místě je blízké pole nebo vzdálené pole. Základní metody měření hluku vyžadují měřit ve vzdáleném poli a současně v poli přímých vln, to znamená s dostatečnou vzdáleností od zdroje hluku a současně malým podílem odraženého zvuku.“ (7) Toto lze zajistit obvykle pouze při měření ve velké místnosti s velkou plochou stěn a zároveň s velkým koeficientem pohltivosti stěn. Z finančních důvodů probíhá měření hluku obvykle v běžných laboratorních prostorách. Vybudování vhodných prostor pro experimentální posouzení hluku záleží často na ekonomických možnostech firmy.

5.3. Metody měření hluku

5.3.1. Měření hladiny akustického tlaku

Tato metoda patří mezi základní metody měření hluku zvukoměrem, s jehož pomocí se měří časový průběh akustického tlaku v předem daném místě. Výsledkem měření je obvykle jednočíselný údaj odečtený z měřicího přístroje a je nazýván jako hladina akustického tlaku.

5.3.2. Měření hladiny akustické intenzity

Metoda měření hladiny akustické intenzity je odvozena od metody předchozí. Nejčastější metoda pro měření akustické intenzity je pomocí intenzitní sondy. Tato sonda s dvěma mikrofony umožňuje měření akustického tlaku ve dvou bodech současně. Výsledný akustický tlak pak je dle vztahu:

$$p = \frac{p_a + p_b}{2} \quad [\text{Pa}].$$

11 Výpočet akustického tlaku

Pomocí hodnot, které jsou mikrofony naměřeny, lze vypočítat akustickou rychlost, která se vypočte s využitím Eulerovy rovnice dle následujícího vztahu:

$$v_a = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \frac{p_a - p_b}{\Delta r} dt \quad [\text{m.s}^{-1}].$$

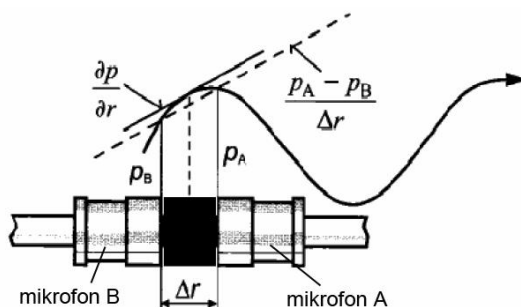
12 Výpočet akustické rychlosti

Jelikož už známe obě hodnoty, a to jak akustický tlak, tak i akustickou rychlost, můžeme provést konečný výpočet intenzity zvuku dle vzorce:

$$I = p v_a = -\frac{p_a + p_b}{2\rho\Delta r} \int_{-\infty}^t (p_b - p_a) dt \quad [\text{W.m}^{-2}].$$

13 Výpočet intenzity zvuku

Na obrázku 4 je znázorněno měření akustické intenzity pomocí intenzitní sondy.



Obrázek 4 Část intenzitní sondy (8)

S pomocí této sondy lze měřit jen jednotlivé složky vektoru intenzity. Jelikož je akustická intenzita veličinou vektorovou, musíme v případě potřeby provést měření

ve třech na sebe kolmých směrech. Výslednou hladinu akustické intenzity pak lze dopočítat podle příslušného vzorečku v kapitole Intenzita zvuku (8) a (9).

5.3.3. Měření akustického výkonu

Akustický výkon je jediná akustická konstanta, která charakterizuje zdroj hluku. Umožňuje tak srovnání jednotlivých zdrojů zvuku navzájem a jejich hodnocení v technické akustice. Tato veličina není závislá na žádných vnějších podmínkách. Měření akustického výkonu je tedy jedním ze základních měření v akustice a hodnota akustického výkonu bývá již udávána na výrobcích, neboť je to vyžadováno legislativou. Ve své podstatě lze akustický výkon zjistit několika způsoby.

5.3.3.1. Metoda měření akustického tlaku

Při měření pomocí této metody máme dvě možnosti měření.

První možností je měření v poli volném, které je vytvořeno pomocí bezodrazové nebo polobezodrazové komory. Vztah pro určení výsledné hladiny akustického výkonu z veličin měřených ve volném zvukovém poli je:

$$L_w = L_{pr} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad [\text{dB}],$$

14 Výpočet hladiny akustického výkonu

kde

L_{pr} [dB] - průměrná hladina akustického tlaku na měřené ploše,

S [m^2] - velikost měřené plochy,

S_0 [m^2] - vztážná hodnota 1m^2 .

Druhou možností je měření v difúzním poli, které je vytvořeno pomocí dozvukové komory. Při měření v dozvukové komoře se vychází z toho, že výkon, který je pohlcen stěnami komory, musí být roven výkonu, který je vyzařovaný zdrojem. Příslušná velikost akustického výkonu je dána vztahem:

$$W = \frac{\overline{p^2} a}{4 \rho_0 c_0} \quad [\text{W}],$$

15 Výpočet akustického výkonu

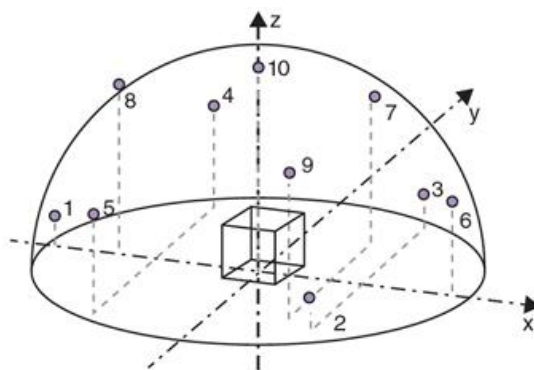
kde

- $\overline{p^2}$ [Pa] - střední hodnota kvadrátu akustického tlaku přes objem komory,
a [dB] - pohltivost stěn dozvukové komory,
 ρ_0 [kg.m⁻³] - hustota prostředí,
 c_0 [m.s⁻¹] - rychlost šíření zvuku.

Průměrnou střední hodnotu akustického tlaku můžeme získat pomocí pole mikrofونů rozmístěných po komoře nebo s jedním mikrofونem, který je po komoře postupně přemísťován (9).

5.3.3.2. Metoda měření akustické intenzity

U tohoto principu měření se okolo zdroje hluku vhodně zvolí měřící plocha. Mezi nejčastěji volené plochy patří např. plocha kvádru, krychle či polokoule. Volený povrch musí být jednoduchý, protože na takovýchto plochách lze snadno definovat a určit průměrnou hodnotu kolmé složky intenzity. Celkový výkon je pak udáván jako součet výkonů z každé plochy. Při zvolení polokoule jsou všechny měřící body umístěny ve stejné vzdálenosti od středu zdroje hluku. Příklad takového rozmístění mikrofонů je vidět na obrázku 5. Když bude docházet k velkým změnám hodnot intenzity, musí se zvýšit počet měřících bodů, aby došlo ke zpřesnění výsledků měření (9).



Obrázek 5 Metoda měření akustické intenzity (24)

Vztah pro výpočet akustického výkonu při měření metodu akustické intenzity tedy je:

$$W = \int_S \mathbf{I} n dS = \int_S I_n dS \quad [\text{W}],$$

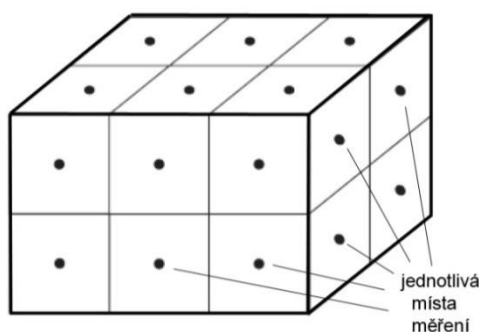
kde

I_n [W. m⁻²] - orientovaná velikost normálové složky vektoru intenzity zvuku,

\mathbf{n} [-] - jednotkový vektor kolmý k ploše S.

Samotné měření může opět probíhat několika způsoby.

Jednou z možností je metoda měření v bodech. U této metody je měřicí plocha rozdělena na několik částí a ve středu každé části se měří akustická intenzita. Obrázek 6 zobrazuje možné rozdělení ploch, jsou na něm také vyznačeny místa měření (10).



Obrázek 6 Rozdělení ploch při měření akustické intenzity (9)

Vztah pro výpočet akustického výkonu je pak suma všech elementů a je následující:

$$W \approx \sum_{i=1}^N I_{ni} S_i \quad [\text{W}],$$

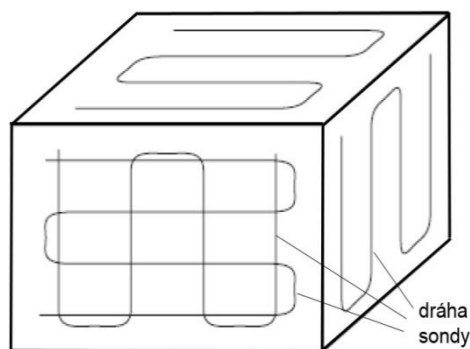
17 Výpočet akustického výkonu

kde

I_{ni} [W. m⁻²] - normálové intenzita zvuku ve středu plochy S_i ,

N [-] - počet elementů rozdělené plochy.

Další možný způsob je metoda měření skenováním. U této metody se většinou zvolí čtvercová nebo obdélníková plocha, aby bylo zaručeno rovnoměrné pokrytí měřícími dráhami. Měření pak probíhá spojitým pohybem sondy na měřících plochách obklopujících zdroj hluku. Metoda je tak založena na prostorovém průměrování kolmé složky měřené intenzity. Pohyb sondy je často zajištěn pomocí speciálních přídavných zařízení kvůli zajištění jejího plynulého pohybu. Příklad zvolené plochy s vyznačeným pohybem sondy je vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 Pohyb sondy při měření akustické intenzity (9)

Výsledný vztah pro výpočet akustického výkonu pak je:

$$W = S \frac{1}{T} \int_0^T I_n(t) dt \quad [\text{W}],$$

18 Výpočet akustického výkonu

kde

$I_n(t)$ $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ - normálová složka akustické intenzity, která je funkcí času,

S $[\text{m}^2]$ - celková plocha měření,

T $[\text{s}]$ - celková doba měření.

5.4. Zhodnocení měřících metod

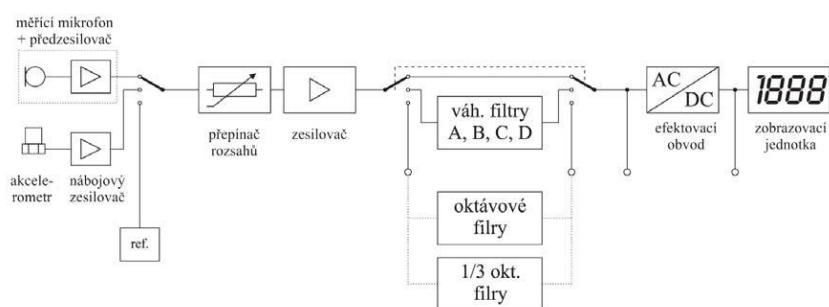
Metody uvedené v této kapitole slouží většinou k měření akustických veličin, tj. nejsou přímo určeny k měření hluku při spalování. Metoda, která je určena pro měření hluku spalování, je popsána v kapitole Metody měření hluku spalování praktické části této práce. Co se týče uvedených metod, každá z nich má svá omezení. Při měření jsme u některých metod omezení frekvenčním rozsahem, který se projevuje jak na nízkých, tak na vysokých frekvencích jako je tomu např. u metod měření akustické intenzity. Při využití některých metod zase nelze měření provádět v dosahu konkrétního zařízení vydávajícího hluk (např. některé z metod měření akustické výkonu).

6. Zařízení na měření akustických veličin

K základním zařízením k měření hluku patří zvukoměr, který slouží k měření akustického tlaku a intenzitní sonda pro měření akustické intenzity.

6.1. Zvukoměry

Jsou to zařízení, která jsou používána k měření hluku nejčastěji. Zvukoměry se používají jako zařízení pro měření akustického tlaku. Zvukoměry jsou velmi přesná elektrická zařízení, která se skládají z mnoha částí. Blokové schéma zvukoměru je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8 Blokové schéma zvukoměru (12)

Konstrukce a provedení zvukoměrů jednotlivých výrobců na trhu může být různá, ale ve své podstatě obsahují stále stejné části nebo části velmi podobné. Všechny zvukoměry ale budou obsahovat části hlavní, a to jsou mikrofón a indikační zařízení neboli zobrazovací jednotka.

Z konstrukčního hlediska lze zvukoměry dělit na zvukoměry stolní a přenosné. U zvukoměru stolního je nevýhodou jeho omezený pohyb. Většinou s ním nelze manipulovat, kdežto u zvukoměru přenosného - ručního není pohyb většinou nijak omezen. Příklad ručního zvukoměru je na obrázku 9.

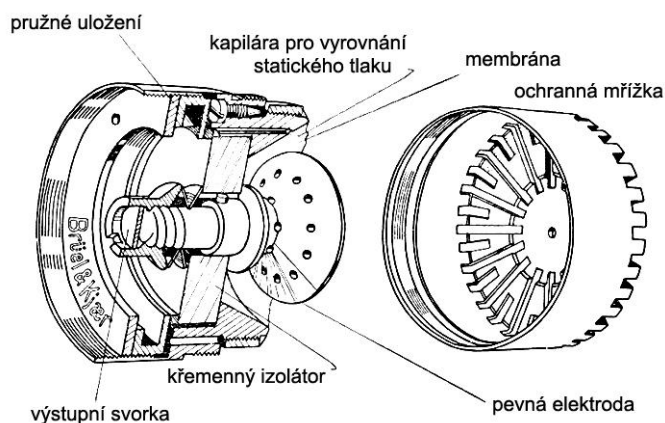


Obrázek 9 Ruční zvukoměr B&K 2270 (31)

V současné době existuje celá řada doplňkových komponentů, které umožňují rozšíření měřicího zařízení, jako jsou například snímače zrychlení.

6.1.1. Mikrofon

Mikrofon je nejdůležitější částí měřicího řetězce každého zvukoměru. Mikrofon se používá jako snímač pro měření hluku, konstrukce je nejčastěji na principu kondenzátoru, a proto se nazývají mikrofony kondenzátorovými. Konstrukčně je mikrofon udělán tak, že jedna elektroda je pevná a druhá vytváří pružnou membránu. Tato membrána se v prostředí vlivem tlakových změn deformuje a tím se mění vzdálenost mezi elektrodami a zároveň i kapacita snímače. Řez reálným mikrofonom s oběma elektrodami je vidět na obrázku 10.



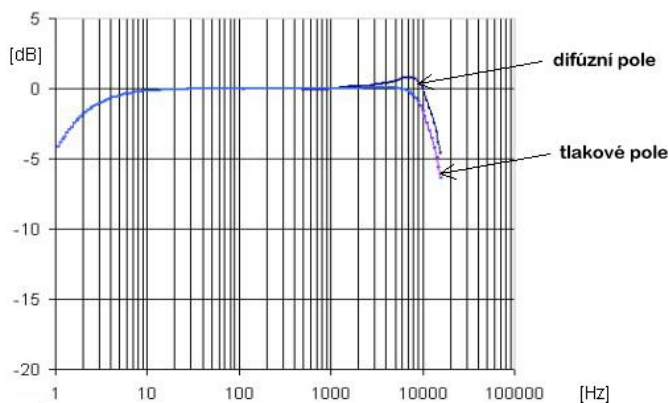
Obrázek 10 Řez reálným mikrofonom (11)

Mikrofon je zařízení na přeměnu akustického (zvukového) signálu na signál elektrický. Na elektrody se přivádí konstantní náboj, který má za úkol vytvářet napětí nepřímo úměrné kapacitě. Při malých tlakových rozdílech platí lineární vztahy mezi změnou tlaku a změnou kapacity, podobně i mezi změnou kapacity a změnou napětí je výstupní napětí přímo úměrné akustickému tlaku. Kondenzátorové mikrofony jsou považovány za nej kvalitnější, a proto se vyrábějí právě pro měřicí účely. Další možností provedení jsou mikrofony s piezoelektrickými snímači akustického tlaku. Provedení reálných mikrofonů je na obrázku 11.

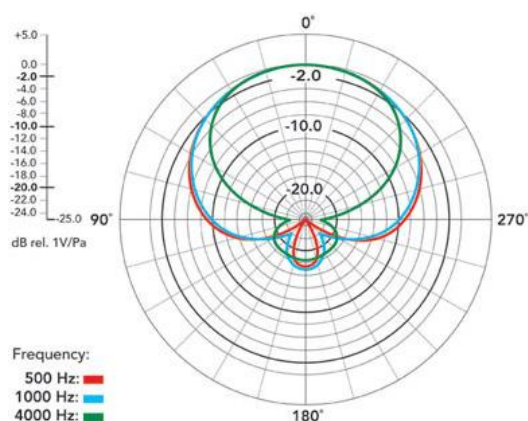


Obrázek 11 Příklady mikrofonů (19)

Konstrukce mikrofonů musí být co nejvíce jednoduchá, ale zároveň velmi odolná. Mikrofony musejí mít dobrou časovou stabilitu s vysokou citlivostí při správném užívání i mnoho let. U mikrofonů je především důležitá lineární frekvenční charakteristika, která udává schopnost mikrofonu měřit hluk v určitém frekvenčním rozsahu. Příklad je na obrázku 12. Další je směrová charakteristika mikrofonu, která udává citlivost ke zvuku přicházejícímu z různých směrů. Příklad je na obrázku 13.



Obrázek 12 Amplitudová frekvenční charakteristika mikrofonu (19)

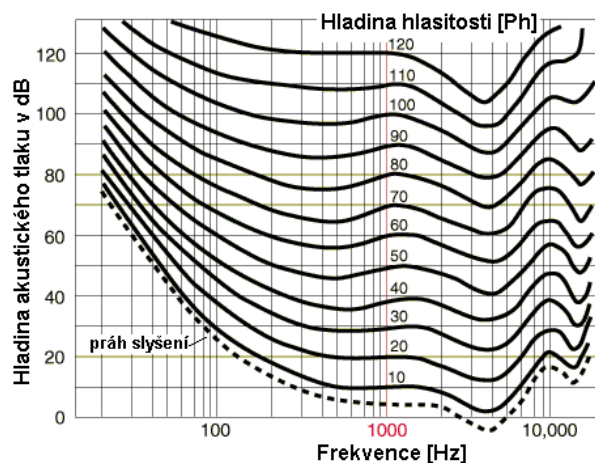


Obrázek 13 Směrová charakteristika mikrofonu (20)

U mikrofonu je třeba při měření dávat pozor na některé vlivy prostředí, především vliv větru. Proto jsou mikrofony opatřeny krytem. Vlhkost a teplota na měření ve své podstatě vliv nemá (7) a (11).

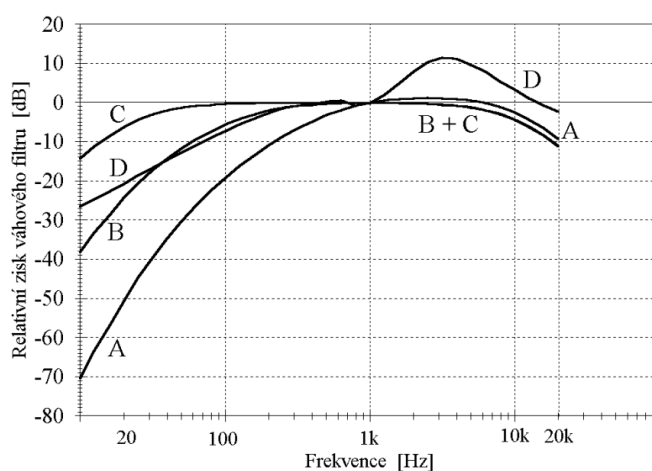
6.1.2. Váhové filtry

Další důležitou částí každého zvukoměru jsou váhové filtry. Tyto filtry mají za úkol přizpůsobit frekvenční charakteristiku měřeného signálu charakteristice lidského ucha. Jelikož lidský sluch vnímá hlukové jevy mnohem složitěji, záleží především na jeho intenzitě, ale i na čase působení, frekvenci, průběhu atd., převádí právě tyto filtry hodnoty akustických veličin na hladiny intenzity. Pokud budeme tedy porovnávat akustické signály stejných intenzit o různých frekvencích, budou se nám zdát různě hlasité. Tento efekt popisuje diagram křivek stejné hlasitosti na obrázku 14.



Obrázek 14 Křivky konstantní hlasitosti (21)

Signál se filtruje za pomoci filtrů, které napodobují spektrální citlivost lidského ucha. Pro různé intenzity zvuku je tato citlivost různá, a proto bylo definováno mnoho různých váhových křivek. Standardně se používají čtyři váhové filtry, a to váhové křivky A, B, C a D. Váhové filtry A, B a C jsou inverzní ke křivkám konstantní hlasitosti při hladinách 40, 80 a 120 [dB], křivka D se používá při měření leteckého hluku. Váhové filtry byly dříve určeny pouze tabulkovými hodnotami a zpracovány analogově. V digitálních měřidlech jsou váhové filtry dány matematickými předpisy. V dnešní době se pro hodnocení používá nejčastěji váhová křivka typu A (12). Čtyři standardizované křivky ukazuje obrázek 15.



Obrázek 15 Standardizované váhové křivky (22)

Ke zvukoměrům lze připojit vnější filtry, které umožňují např. třetinooktávovou nebo oktávovou filtraci (2).

6.1.3. Zesilovač, efektovací obvod, zobrazovací jednotka

Zesilovač je umístěn v bezprostřední vzdálenosti za mikrofonom a má velký vstupní odpor. Efektovací obvod je velmi důležitá součást zařízení, která zaručuje schopnost zvukoměru určit efektivní hodnotu měřeného signálu. Protože není možné dostatečně rychle sledovat změny akustického tlaku z důvodu setrvačnosti výstupního měřidla, jsou zde zařazeny integrační obvody. Ty určují průměrnou hodnotu akustického tlaku v určitém čase. Čas je určen dle časové konstanty zvolené na zvukoměru. Normou jsou stanoveny tři standardizované časové konstanty, a to:

S (slow) - kde se vyhodnocuje průměrná hodnota měřeného signálu za uplynulou 1 [s],
 F (fast) - kde se vyhodnocuje průměrná hodnota měřeného signálu po uplynutí 200 [ms], I (impuls) - tato nesymetrická časová konstanta má pro náběh hodnotu 35 [ms] a pro pokles 2 [s] (12).

Zobrazovací jednotka je v dnešní době už většinou digitální a slouží k zobrazení výsledku měření na displeji. V dnešní době jsou tři třídy přesnosti zvukoměrů, a to dle tabulky 2.

Třída přesnosti	Zvukoměr
0	laboratorní
1	přesný
2	provozní

Tabulka 2 Třídy přesnosti zvukoměrů (13)

6.1.4. Zvukoměr B&K 2270

Ruční analyzátor B&K 2270 patří v současné době k nejmodernějším přenosným zařízením k měření, analýze a záznamu hluku a vibrací na trhu. Tento zvukoměr je zatím posledním modelem firmy B&K s více než 60letou tradicí v oblasti měření hluku a vibrací. Zařízení umožňuje měření dvěma mikrofony na dvou různých místech současně. Při měření na více místech to tedy výrazně snižuje čas měření. Zařízení umožňuje současné měření vnitřního a vnějšího hluku.

Analyzátor má velký barevný dotykový displej a disponuje třídou krytí IP44², což znamená, že dokáže odolat vniknutí malých částic do přístroje a stříkající vodě. Pro případné rozšíření paměti a ukládání dat poslouží možnost použití SDHC³ a CF⁴ karet.

² Norma s označením stupně krytí.

³ Secure Digital High Capacity, typ paměťové karty.

⁴ CompactFlash, typ paměťové karty.

Přímo v zařízení je umístěna vestavěná kamera, která umožňuje pořízení fotodokumentace z místa měření, fotografie lze připojit poté k výslednému protokolu měření nebo použít pro další potřeby měření.

K přenosu dat a dalších záznamů měření ze zařízení slouží USB⁵ rozhraní. Je také vybaveno sítí LAN⁶, která mimo jiné umožňuje i on-line ovládání přístroje přes počítač.

V dnešní době jsou moderní ruční analyzátory konstruovány tak, aby dokázaly okamžitě ukázat a vyhodnotit výsledky měření přímo na místě měření bez potřeby dalšího příslušenství nebo počítačové podpory. Možné provedení zvukoměru je vidět na obrázku 16.



Obrázek 16 Příklad ručního zvukoměru B&K 2270 (31)

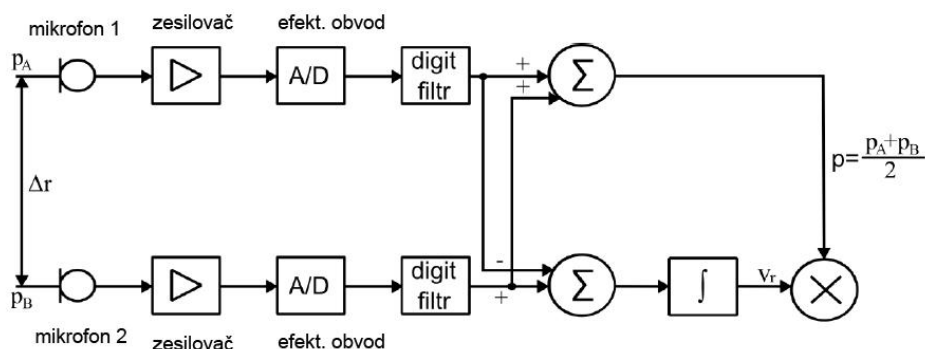
6.2. Intenzitní sondy

Na rozdíl od zvukoměrů, které se využívají na měření akustického tlaku, se intenzitní sondy používají na měření akustické intenzity. Existuje několik typů těchto sond. Jednou z variant je, že se sonda skládá stejně jako zvukoměr ze snímacích mikrofónů, sonda na rozdíl od zvukoměru nevyužívá mikrofón jeden, ale dva. Oba mikrofóny jsou opět většinou kondenzátorové a mohou být uspořádány v různých vzájemných polohách. Různé možnosti jsou například mikrofóny proti sobě nebo vedle sebe či případně za sebou. Mezi nejčastější uspořádání mikrofónů patří poloha proti sobě.

⁵ Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice, způsob připojení zařízení k PC.

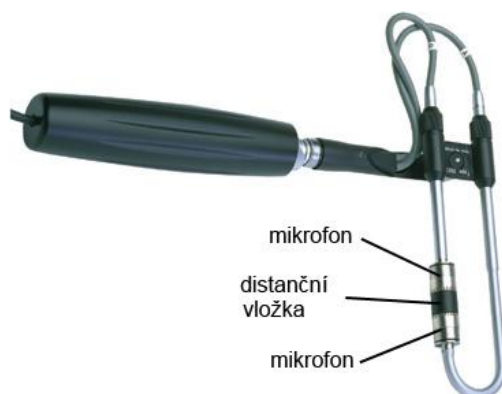
⁶ Local Area Network, označení pro lokální – místní počítačovou síť.

Tato poloha má nejlepší vlastnosti jak z hlediska směrové charakteristiky, tak i zdaleka nejlepší frekvenční odezvu než u jiných typů uspořádání, které jsou uvedeny. Intenzitní sondy jsou stejně jako zvukoměry velmi přesná elektrická zařízení, která se skládají z mnoha částí. Intenzitní sondy jsou i složením jednotlivých částí velmi podobné zvukoměrům. Blokové schéma intenzitní sondy je vidět na obrázku 17 (8).



Obrázek 17 Blokové schéma intenzitní sondy (8)

Vzdálenost označená v obrázku jako Δr je přesně určená vzdálenost mezi oběma mikrofony. Tato vzdálenost se zajišťuje pomocí distančních vložek, které jsou většinou gumové a jejichž velikosti se z důvodů frekvenčního omezení pohybují v mezích od 6 [mm] do 50 [mm] maximálně. Volba velikosti kondenzátorového mikrofону a distanční vložky tedy závisí na frekvenčním rozsahu měření. Tento typ sondy měřící akustickou intenzitu je založen na principu měření akustického tlaku ve dvou místech v přesně definované vzdálenosti. Skutečný příklad intenzitní sondy měřící akustickou intenzitu na základě tlaku na dvou různých místech je na obrázku 18.



Obrázek 18 Intenzitní sonda (19)

Druhou variantou intenzitní sondy je nahrazení jednoho z mikrofónů snímačem akustické rychlosti. Tento typ sondy nemá tak časté využití jako příklad první z důvodů většího finančního zatížení (2).

6.3. Kalibrace zařízení na měření akustických veličin

Pro případy, kdy je třeba provádět velmi přesná měření, je třeba zařízení používaná k měření kalibrovat. Kalibrace by měla být provedena před začátkem měření a na konci měření. Pokud je měření časově náročnější a podmínky to umožňují, provádí se kalibrace i v průběhu měření. Samotná kalibrace je provedena pomocí akustických kalibrátorů dle normy ČSN EN 61183⁷. *„Popisuje metodu kalibrace ve volném zvukovém poli pro určení hladin citlivosti zvukoměru ve zvukovém poli s náhodným dopadem zvuku. Dále popisuje metodu kalibrace v difúzním zvukovém poli pro určení hladin citlivosti v difúzním zvukovém poli.“* (14) Kalibrace se provádí z důvodů ověření přesnosti výsledků měření hluku. Pokud dojde při kalibrování k velkým změnám oproti počátečnímu stavu, je třeba měření opakovat. Kalibrace je metrologický úkon a probíhá podle přesně daného písemného postupu (2).

⁷ Československá norma Evropská norma

7. Metody zpracování signálu

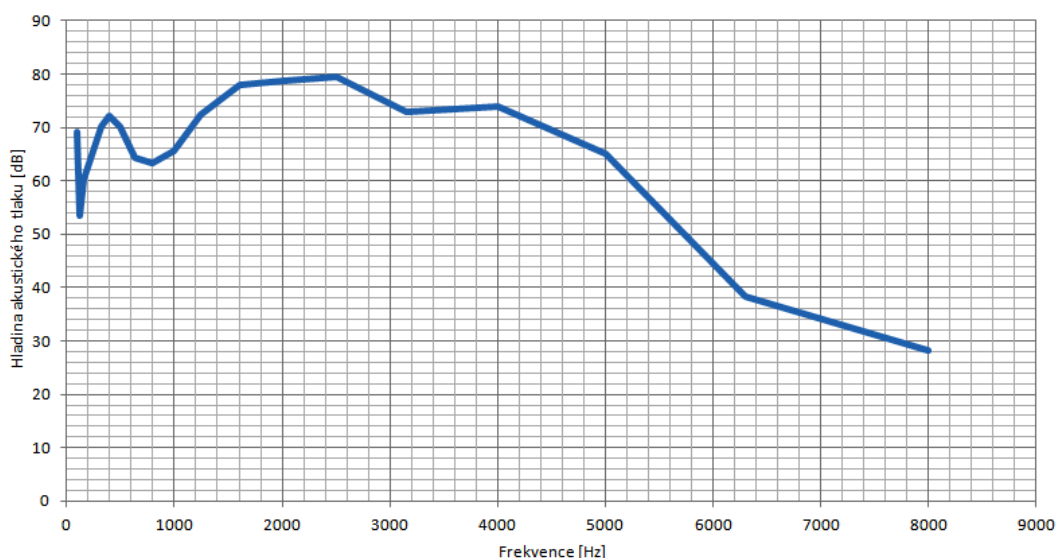
V současné době s rozvojem výpočetní techniky existuje mnoho možností, jak zpracovávat signál z jednotlivých metod měření. Z těchto důvodů pro naše účely bude plně dostačující se zmínit jen o některých možnostech zpracování signálu, protože uvedení všech možností by bylo značně obsáhlým.

7.1. Analýza signálu v časové oblasti zvuku

Informace o jakémkoli technickém či fyzikálním ději je v signálu reprezentována časovými změnami okamžité hodnoty fyzikální veličiny, kterou signál popisuje. Přímé vyhodnocení časově amplitudové reprezentace není v mnoha aplikacích snadné a ani výhodné. Proto se provádí transformace signálu z časové do jiné oblasti, například do oblasti frekvenční.

7.2. Analýza signálu ve frekvenční oblasti zvuku

Tato analýza, která je nazývána jako spektrální analýza, je již pro naše zpracování výhodnější. Dokáže popisovat signál na základě jeho složek ve frekvenční oblasti. Možný výsledek tohoto zpracování je viditelný na obrázku 19.



Obrázek 19 Frekvenční spektrum hluku spalování

7.3. Filtrace signálu

Slovem filtrace se obecně nazývají takové operace, které vedou k oddělení užitečné a rušivé složky nebo také ke zvýraznění důležitých složek časových řad, jež jsou předmětem zpracování či podrobeny analýze. Termín filtrace sám o sobě upozorňuje na fakt, že cílem je určité složky propustit či zesílit, ale zároveň utlumit zbývající. Filtrace jakýchkoli signálů patří mezi ty nejjednodušší úpravy, které lze provádět.

Při filtraci signálu dojde k rozdělení signálu na jednotlivá frekvenční pásma, ze kterých už jsou odfiltrovány nepotřebné frekvence. Většinou se jedná o horní a dolní části frekvencí (15).

7.3.1. Synchronní filtrace signálu

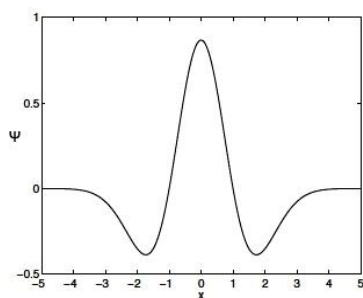
Synchronní filtrace je jednou z funkcí FFT⁸ analyzátorů. Tato metoda zpracování signálu umožňuje potlačení složek, které nejsou synchronní s hledaným signálem. Je to například potlačení opakujících se rušení, šumu atd. Analyzátorů typu FFT shromažďují vzorky dat do tzv. záznamů, které jsou zpracovány algoritmy DFT⁹. Délka těchto záznamů je mocnina 2, tj. $N = 2^k$, kde k je přirozené číslo. Dnešní analyzátorů pracují s pevnou délkou záznamů 1024 nebo 2048 vzorků. Pevná délka záznamů může být samozřejmě u některých analyzátorů kratší, a to od 128 vzorků nebo také delší, a to až do 8192 vzorků. Vstupní data v jednom záznamu představují vektor o počtu prvků N . Starty měření záznamů jsou dány podmínkami spouštění, které souvisejí s časovým průběhem měřeného signálu nebo dalšího pomocného - synchronizačního signálu. Záznamy na sebe mohou, ale také nemusejí navazovat. Součástí funkcí signálového procesoru FFT analyzátoru je průměrování změřených nebo vypočtených hodnot. Tuto funkci lze využít také pro časovou oblast (16).

⁸ Fast Fourier Transform, v překladu rychlá Fourierova transformace, algoritmus pro spočtení DFT.

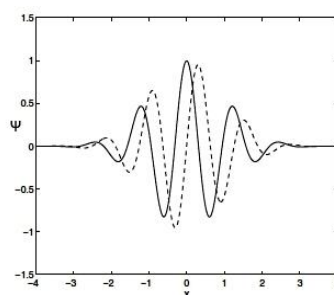
⁹ Discrete Fourier Transform, v překladu diskrétní Fourierova transformace, slouží pro numerický výpočet Fourierovy transformace.

7.4. Vlnková transformace signálu

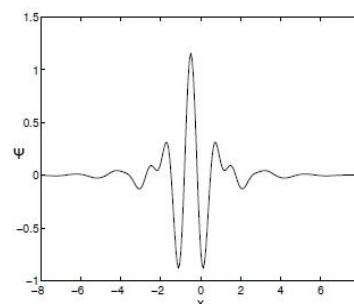
Vznik vlnkové transformace je jedním z výsledků snahy získat časově - frekvenční popis signálu. Ve své podstatě starší Fourierova transformace dávala informaci pouze o tom, které frekvence se v signálu nacházejí, ale neumožňovala zjistit jejich polohu v čase. Těmito vlastnostmi byla tedy vhodná pouze pro popis stacionárních signálů. Myšlenkou vlnkové transformace je přes vhodnou změnu šířky “okna” v čase a jeho tvarem dosáhnout neoptimálnějšího poměru rozlišitelnosti v čase a frekvenci. Ve své podstatě se využívají dva typy, a to spojitá vlnková transformace (CWT¹⁰) a diskrétní vlnková transformace (DWT¹¹). Každá transformace má i své vhodné typy vlnek. Pro spojitou vlnkovou transformaci jsou vhodné tři typy křivek, a to vlnky typu Mexican hat, Morletova a Meyerova. Pro diskrétní vlnkovou transformaci je vhodná pouze vlnka typu Morletova. Pro názornost jsou typy vlnek zobrazeny na obrázcích 20, 21 a 22.



Obrázek 21 Křivka Mexican hat (17)



Obrázek 20 Křivka Morletova (17)



Obrázek 22 Křivka Meyerova (17)

Výběr vhodné vlnky je většinou závislý na daném úkolu a je proveden zkusmo nebo intuitivně. Pro zjištění polohy a délku trvání sledovaného jevu je důležité zohlednit při navrhování vlnky tvar charakteristického úseku sledovaného signálu. Všechny tři uvedené typy vlnek jsou symetrické (17).

¹⁰ Continuous Wavelet Transform - integrální transformace pro získání časově-frekvenčního popisu signálu.

¹¹ Discrete Wavelet Transform - integrální transformace pro získání časově - frekvenčního popisu signálu.

7.5. Vyhodnocování signálů

Frekvenčními filtry lze v reálném čase přímo vyhodnotit úroveň složek z jistého frekvenčního rozsahu s tím, že ostatní složky spektra jsou potlačeny. U fyzikálně realizovaných filtrů časového průběhu signálu neexistuje jediná hraniční frekvence mezi propustným a nepropustným pásmem frekvencí, ale celé přechodové pásmo. Lze tedy zjednodušeně předpokládat ideální filtr bez přechodového pásma, který má spodní mezní frekvenci f_s a horní mezní frekvenci f_h . S jejich pomocí pak můžeme definovat absolutní šířku propustného pásma nebo relativní šířku pásma. Vzájemný vztah mezi šířkami pásem frekvenčního rozsahu spektra určuje dvě základní skupiny analyzátorů (2).

První typ je s konstantní relativní šířkou pásma, tzv. CPB¹² analyzátor, který charakterizuje logaritmická frekvenční osa. Střed propustného pásma u analyzátorů s konstantní relativní šířkou pásma (CPB) je definován geometrickým průměrem horní a spodní mezní frekvence, tj. vztahem:

$$f_c = \sqrt{f_s \cdot f_h} \text{ [Hz]},$$

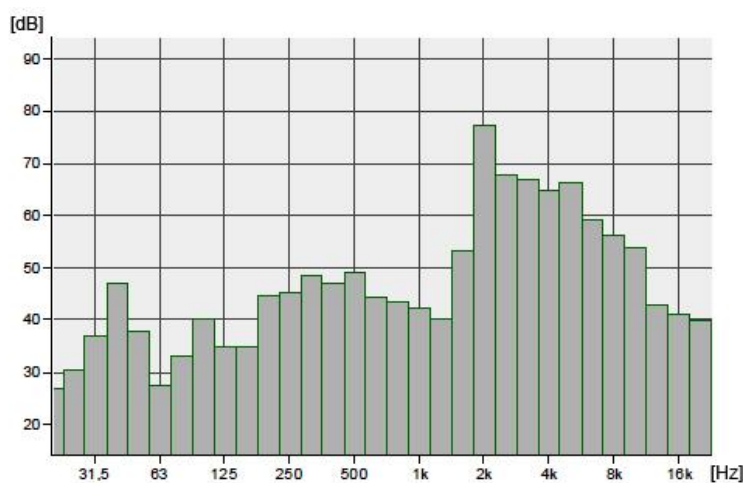
19 Výpočet středu propustného pásma

kde

f_s [Hz] - spodní mezní frekvence,

f_h [Hz] - horní mezní frekvence.

Jak může vypadat výsledný graf frekvenční analýzy CPB je na obrázku 23.



Obrázek 23 Graf frekvenční analýzy CPB (22)

¹² Constant Percentage Bandwidth je typ analyzátoru s konstantní relativní šířkou pásma.

Druhým základním typem analyzátoru je s konstantní absolutní šířkou pásma a nejčastějším typem je tzv. FFT analyzátor, který charakterizuje lineární frekvenční osa (16). Střed propustného pásma u těchto analyzátorů je definován aritmetickým průměrem opět horní a spodní mezní frekvence, tj. vztahem:

$$f_c = \frac{f_s + f_h}{2} \text{ [Hz]},$$

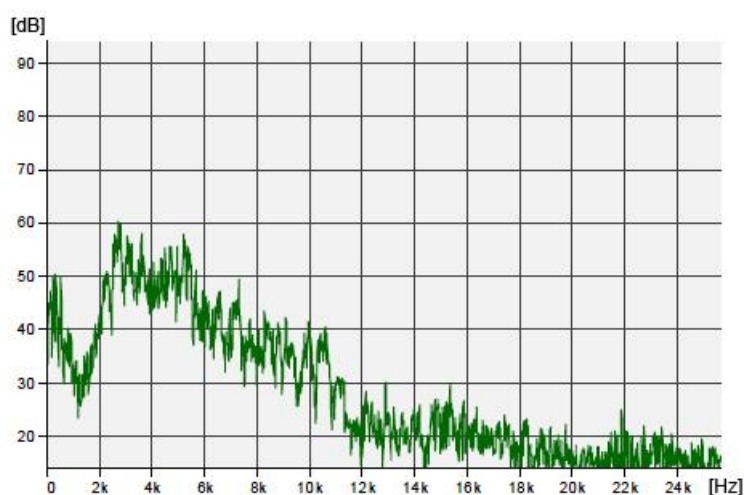
20 Výpočet středu propustného pásma

kde

f_s [Hz] - spodní mezní frekvence,

f_h [Hz] - horní mezní frekvence.

Možný výsledek tohoto zpracování je na obrázku 24.



Obrázek 24 Graf frekvenční analýzy FFT (22)

8. Měření hluku motoru při spalování

Znalost dějů, které vznikají ve spalovacím motoru při spalování paliva, je základním předpokladem pro udržení trendů vývoje a optimalizace pístových spalovacích motorů. Měřením a analýzou tlaku ve válci pístového spalovacího motoru jsme schopni získat potřebná data, která je možné dále zpracovávat. Tato data jsou důležitá pro další optimalizaci výkonu motoru, zlepšení jeho účinnosti a emisních limitů a v neposlední řadě pro zvýšení celkové životnosti motoru. Pístové spalovací motory jsou skupinou tepelných strojů, u kterých dochází spalováním k přeměně chemické energie ze směsi paliva a vzduchu na energii mechanickou a teplo. Dnešní moderní měřicí technika pak dokáže zaznamenávat změnu tlaku s potřebnou přesností. Průběh změny tlaku je pak reprezentativním ukazatelem spalovacího procesu (18).

8.1. Metody měření hluku spalování

Metody měření hluku spalování, jako jsou vysokotlaká a nízkotlaká indikace, se staly v poslední době důležitým analytickým nástrojem využívaným k optimalizaci účinnosti spalovacího motoru. Je to dáno především vývojem počítačové a výpočetní techniky, která umožňuje dosáhnout dostatečné přesnosti zařízení. Obě metody lze provést v laboratoři indikační a vizualizační techniky Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci.

8.1.1. Snímače tlaku

Při technických měřeních se pro měření tlaků nejčastěji využívá křemene. Křemen se většinou upravuje do tvaru šestibokého hranolu, který má tři základní osy. Křemen má také velmi dobré vlastnosti z hlediska piezoelektrického jevu. Princip tohoto jevu je, že uvnitř krystalu se vlivem jeho deformace generuje elektrické napětí, případně opačný, kdy se krystal deformuje v elektrickém napětí. Při měření tlaku ve válci motoru se u snímačů využívá právě piezoelektrického jevu. Snímač se při působení neelektrických veličin chová jako generátor elektrického náboje. Tento náboj, který vzniká při působení měřené veličiny, se převádí na napětí. Vztahy pro výpočet výstupního napětí jsou následující:

$$Q = K_p F_x \quad \text{pro podélný piezoelektrický jev a}$$

21 Výpočet elektrického náboje

$$Q = -K_p F_y \frac{b}{a} \quad \text{pro příčný piezoelektrický jev,}$$

22 Výpočet elektrického náboje

kde

K_p [C.N⁻¹] - je piezoelektrická konstanta,

F_x, F_y [N] - jsou působící síly v příslušných směrech,

a, b [m] - jsou rozměry destičky,

Q [C] - je velikost elektrického náboje,

$$U = \frac{Q}{C},$$

23 Výpočet elektrického napětí

kde

C [F] - je kapacita čidla,

U [V] - je výstupní napětí snímače.

V praxi je běžné použití dvou základních typů snímačů. Prvním typem piezoelektrického snímače je snímač nechlazený. Tento typ snímače je vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 Piezoelektrický snímač nechlazený (26)

Snímače, které nemají nucené chlazení, mohou standardně pracovat v rozmezí teplot od -150 [°C] až po teploty do 250 [°C]. V případě překročení teploty 250 [°C] se musí zajistit přídavné zařízení k chlazení, aby nedošlo k poškození snímače. Nechlazené snímače se většinou používají pro nízkotlakou indikaci, a to především pro měření tlaku sacího potrubí motoru. Sací potrubí motoru není tak teplotně

namáhané, a proto lze tento snímač použít. Při užití snímače ve výfukovém potrubí se většinou ještě využívá přídavného zařízení pro chlazení. Stejný případ platí i pro vysokotlakou indikaci.

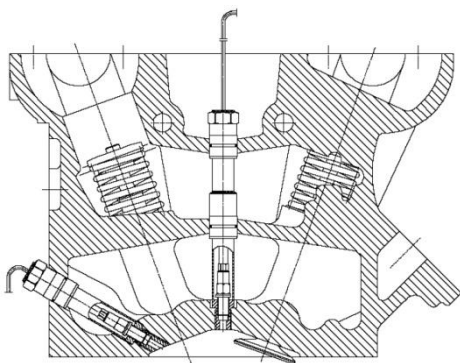
Druhou variantou jsou piezoelektrické snímače chlazené. Jejich použití je nutné při překročení teploty 250 [°C]. Typ takového snímače je na obrázku 26.



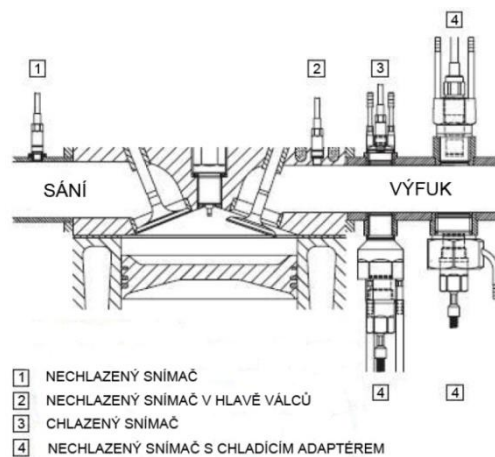
Obrázek 26 Piezoelektrický snímač chlazený (26)

Piezoelektrické snímače nejsou vhodné pro měření tlaků statických. Jejich hlavní použití je pro měření tlakových rázů s maximálními tlaky až 500 [MPa] a měření impulzů (18).

Důležitou podmínkou pro získání reálných a odpovídajících hodnot a výsledků je vhodná instalace snímačů na zkušební motor. Umístění snímače definuje provozní podmínky během měření. Je to například teplotní zatížení, proudění tepla atd. Vzhledem k vysoké citlivosti snímače je nutné vzít v úvahu vliv teploty. Pokud se měří rychle se měnící tlak, je nutno zvolit správnou délku přívodního kanálku. Příklady rozmístění snímačů při nízkotlaké a vysokotlaké indikaci jsou vidět na obrázcích 27 a 28.



Obrázek 28 Umístění snímačů vysokotlaké indikace (18)



Obrázek 27 Umístění snímačů nízkotlaké indikace (28)

Piezoelektrickými senzory nelze měřit absolutní tlak, ale pouze změnu tlaku ve válci. Naměřený průběh tlaku je pak nutné upravit o korekci tlaku. Nejpoužívanější je referenční metoda. Naměřená hodnota ve válci se v určité poloze klikového hřídele upravuje o hodnotu referenčního tlaku, který se určuje empiricky nebo měřením. K určení referenčního tlaku měřením se používají piezoresistivní senzory. Tyto senzory měří tlak v sacím potrubí. Příklad piezoresistivního snímače tlaku je na obrázku 29. U empirické metody se odhadne velikost tlaku v sacím potrubí, např. u nepřeplňovaných motorů je to atmosférický tlak nebo tlak plnicí u motorů přeplňovaných.



Obrázek 29 Piezoresistivní snímač (27)

8.1.2. Snímač klikového hřídele

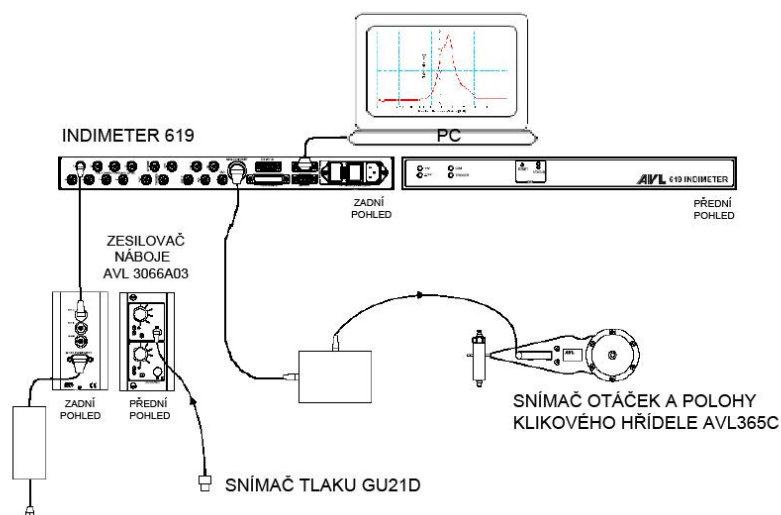
Pro určení přesných otáček klikového hřídele slouží snímače otáček. Tyto snímače se využívají zároveň k určení přesné polohy hřídele. Snímač dokáže snímat otáčky v rozsahu od 20 do 20000 [ot.min⁻¹] a pracovat v teplotním rozsahu od -50 [°C] do cca 150 [°C] (18). Příklad takového snímače je na obrázku 30.



Obrázek 30 Snímač otáček klikového hřídele (30)

8.1.3. Zařízení pro zpracování dat

Pro měření tlaku ve válci motoru nebo v sacím, případně výfukovém potrubí slouží v laboratoři Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci zařízení AVL INDIMETER 619¹³. Toto zařízení spolu s příslušným počítačovým softwarem umožňuje monitorování tlaku ve válci a analýzu spalování pomocí vysokotlaké indikace. Dále umožňuje měření tlaku v sacím a výfukovém potrubí při nízkotlaké indikaci. Obě metody lze použít pro přímé měření tlaku v jakémkoli spalovacím motoru, tj. jak na motorech benzínových tak i motorech dieselových. Složení celého měřicího řetězce je vidět na obrázku 31.



Obrázek 31 Měřicí řetězec tlaku spalování (18)

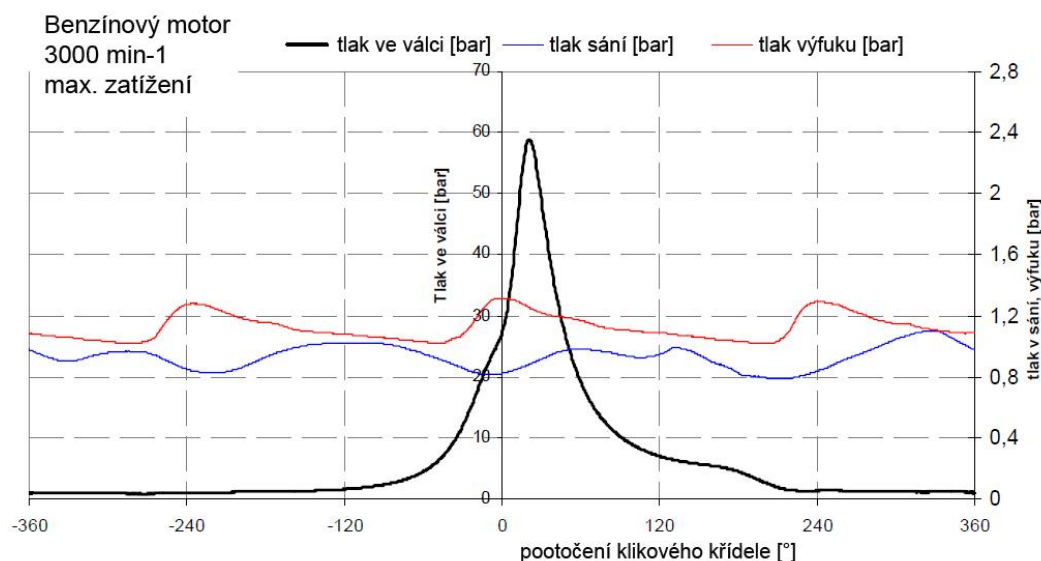
Přímo měřenými veličinami jsou tedy maximální spalovací tlak a poloha maximálního spalovacího tlaku. Nepřímo měřeným parametrem je pak hluk spalování.

8.1.4. Zpracování dat

Výsledek možného zpracování naměřených hodnot je na obrázku 32. Obrázek znázorňuje graf, ve kterém je zaznamenán maximální tlak vzniklý při spalování.

¹³ Systém pro indikaci tlaků ve spalovacím motoru.

Za pomoci výpočetní techniky pak lze data dále zpracovávat a kombinovat pro různé typy výpočtů jako např. hluk spalování.



Obrázek 32 Výsledné zpracování tlaku spalování (18)

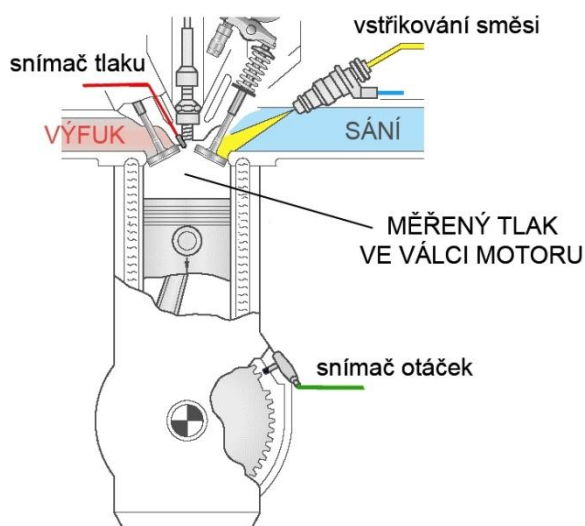
Na výsledky měření má vliv několik faktorů a je potřeba s nimi před začátkem měření, ale i v jeho průběhu počítat. Příkladem je krátkodobý teplotní drift senzoru, který lze minimalizovat vhodnou volbou umístění snímače. S umístěním snímače souvisí také volba vhodné velikosti propojovacího kanálku. Dále je potřeba správně určit polohu horní úvratí pístu. To lze zajistit pomocí snímače polohy pístu (18). Existuje celá řada dalších faktorů, které mají vliv na přesnost měření, ale jejich význam na konečné výsledky je prakticky zanedbatelný.

9. Vlastní měření

Jak již bylo v úvodu této práce sděleno, bylo k vlastnímu měření použito starších dat. Vycházelo se z naměřených hodnot celkem dvou spalovacích motorů. Všechna data byla získána v laboratoři indikační a vizualizační techniky Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci pomocí metody nazývané vysokotlaká indikace. Jeden typ motoru byl zážehový, tedy benzinový a druhý byl vznětový, resp. naftový. Naměřená data jednotlivých motorů byla zaznamenána do grafů a poté vyhodnocena.

9.1. Postup měření

Ke každému motoru byly nejdříve připojeny všechny snímače. Jak již bylo dříve zmíněno, k měření jsme použili metodu vysokotlaké indikace. Tato metoda je založená na principu měření tlaku ve válci motoru. Tlak je měřen pomocí snímače od firmy AVL, který je umístěn přímo v hlavě válce. Tímto piezoelektrickým snímačem tlaku můžeme snadno provádět snímání průběhu tlaku. Zejména nás zajímá průběh tlaku v závislosti na natočení klikového hřídele. K zjištění natočení klikového hřídele použijeme druhý snímač. Tím je snímač otáček opět od firmy AVL. Zobrazení připojených snímačů je na obrázku 33.



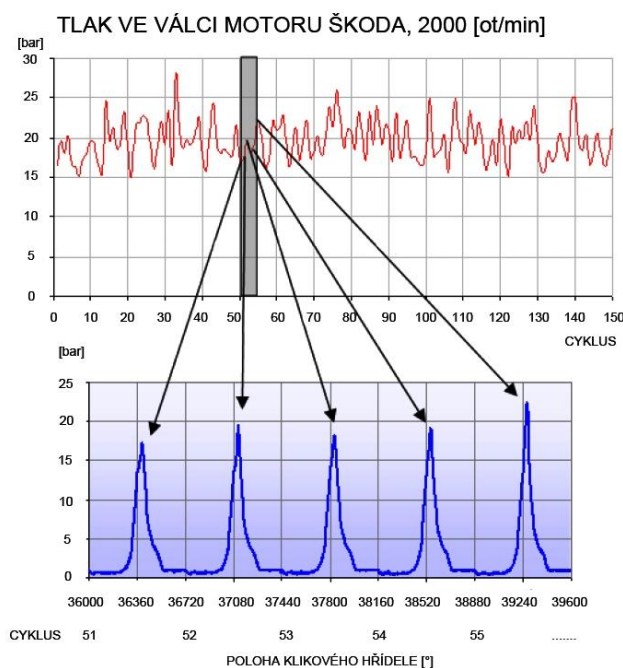
Obrázek 33 Připojení snímačů k motoru (29)

Abychom vůbec mohli nějaké měření provést a získat tak potřebná data, musíme spalovací motor uměle zatěžovat. K tomu slouží většinou dynamometr.

V laboratoři Technické univerzity v Liberci se používá dynamometr od dnes již neexistující firmy MEZServis Vsetín, která v současné době po restrukturalizaci vystupuje pod názvem TES Vsetín. Uvedený dynamometr slouží k zajištění takových podmínek při měření, které jsou shodné s podmínkami při reálném zatěžování motoru v praxi.

Pro měření a analýzu spalovacích tlaků ve válci je třeba využití výpočetní techniky. V laboratoři je využíváno zařízení zvané INDIMETER 619, které zaznamenává pomocí snímačů všechna potřebná data k výpočtu spalovacího tlaku. Při vlastním měření je ještě mezi snímač tlaku a INDIMETER vložen zesilovač náboje firmy AVL. INDIMETER spolu s využitím počítačové techniky pak zaznamenává data, která lze pomocí dalších programů v počítači dále zpracovávat a upravovat. Příklad celého zapojeného měřicího řetězce je vidět na Obrázek 31 v kapitole Zařízení pro zpracování dat.

Takto zapojená indikační sestava je vybavená plně automatizovaným systémem sběru dat, která jsou zaznamenávána jako soubor z určitého počtu pracovních cyklů, v našem případě 150 cyklů. Jeden pracovní cyklus jsou dvě otáčky klikového hřídele. To znamená proběhnutí celého cyklu spalovacího motoru, tj. cyklus sání - komprese - expanze - výfuk. Detailnější popis změn tlaku ve válci za jeden cyklus je uveden v následujících kapitolách, a to pro každý motor samostatně. U každého cyklu je zaznamenán tlak ve válci. Pro každý cyklus je tlak ve válci rozdílný. Příklad zaznamenání tlaku pro 150 cyklů s detailním zobrazením cyklů 51 až 55 je na obrázku 34.

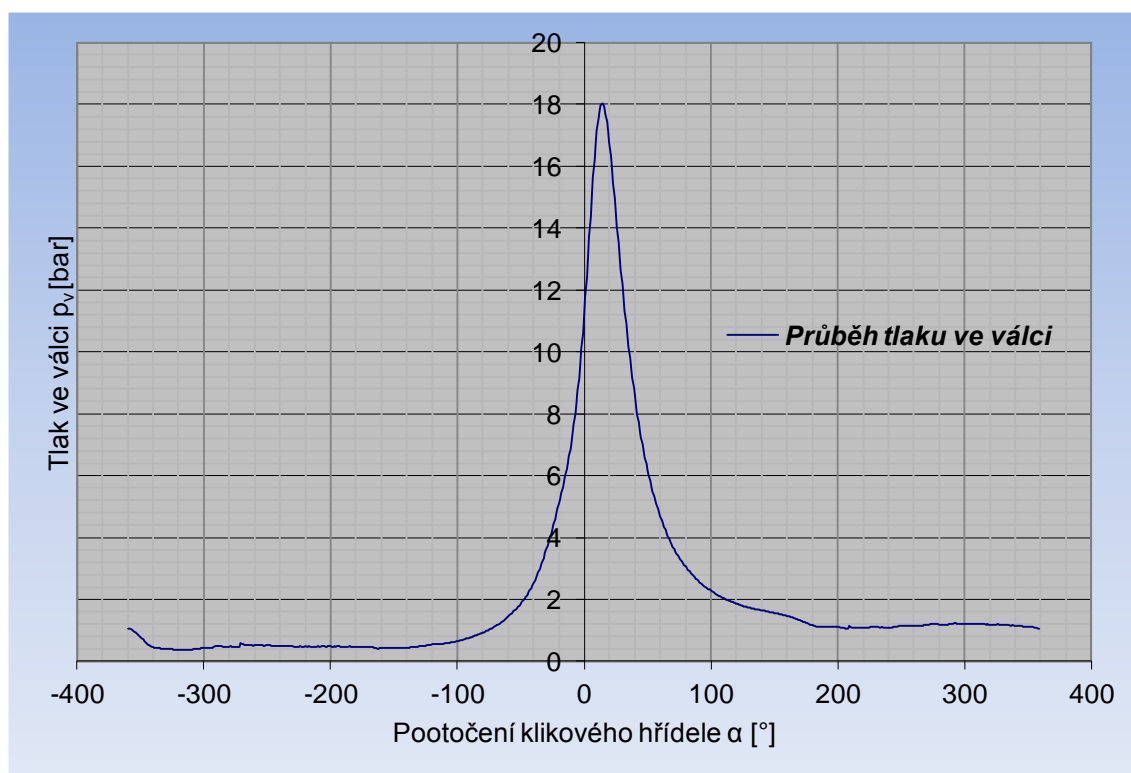


Obrázek 34 Záznam tlaku ve válci pro 150 cyklů (18)

S využitím počítačové podpory, příslušných programů a FFT analýzy pak získáme frekvenční spektra hluku spalování jednotlivých motorů. Z grafu poté vyhodnotíme celkovou hladinu akustického tlaku, a to je cílem prováděného měření.

9.2. Motor ŠKODA 1.2 HTP

Prvním motorem, u kterého bylo provedeno měření tlaku ve válci a následně zjištěn hluk spalování, byl motor Škoda 1.2 HTP. Tento kapalinou chlazený zážehový tříválec má široké použití u osobních automobilů značky Škoda, a to především u modelu Fabia. Základními parametry motoru jsou průměr válce 76,5 [mm], zdvih pístu 86,9 [mm], maximální točivý moment 112 [Nm] při 3000 otáčkách a maximální výkon 47 [kW] při 5400 otáčkách. V porovnání s druhým motorem jde o výkon velmi malý. Motor je tedy vhodný pouze pro osobní automobily s nižší provozní hmotností. Ve válci tohoto pístového spalovacího motoru lze tedy očekávat menší pracovní tlaky.



Obrázek 35 Diagram $p - \alpha$ motoru ŠKODA

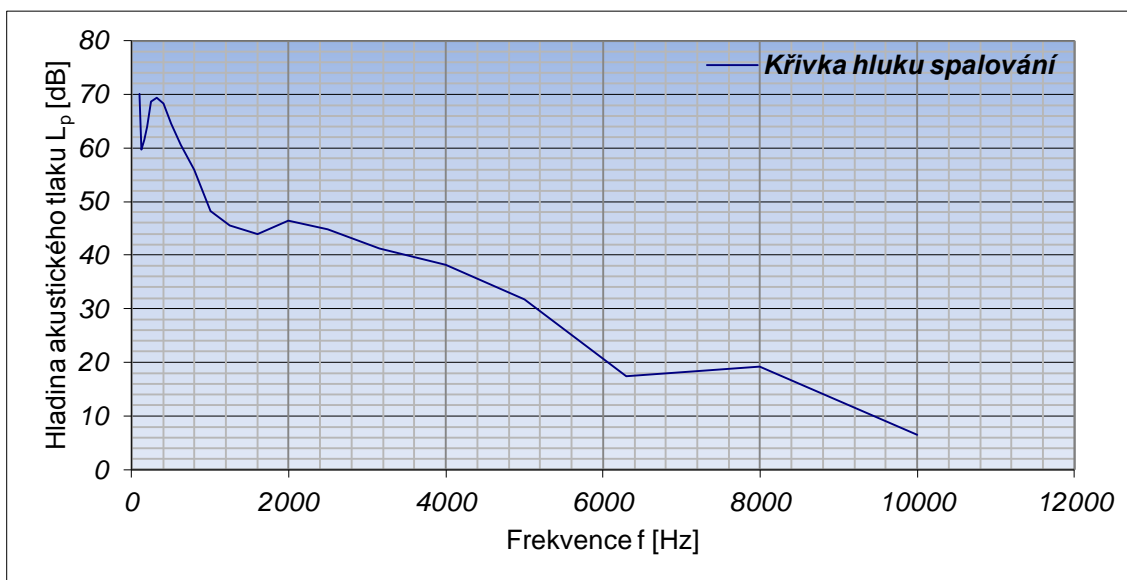
Na obrázku 35 je znázorněn v grafu příklad průběhu tlaku ve válci v závislosti na otáčkách klikového hřídele. Na vodorovné ose je zaznamenáno pootočení klikového

hřídele, na ose svislé zase velikost tlaku ve válci. Právě tlak ve válci je naší první výstupní veličinou. Metodou vysokotlaké indikace byla naměřena hodnota tlaku ve válci pro 150 cyklů. Zprůměrováním jsme došli k výsledku, který je možné vidět v uvedeném grafu.

V průběhu celého měření musí být zaručena konstantnost otáček motoru. Tato podmínka je velmi důležitá. V případě grafu na obrázku 35 byly otáčky nastaveny na hodnotu 1500 [min⁻¹], krouticí moment odpovídal maximální možné hodnotě. Obecně lze říci, že volba otáček velmi ovlivňuje výsledky měření. Se vzrůstající velikostí otáček lze očekávat i narůstající hluk motoru.

Pokud sledujeme průběh velikosti tlaku ve válci motoru, zjistíme, že při sání motoru má tlak nejnižší hodnotu z celého měření. Je to logické, píst se pohybuje směrem dolů a nedochází k žádnému stlačování spalín ve válci. Tento proces je nazýván jako sání. Přes otevřený sací ventil dochází k nasátí směsi paliva.

V druhé fázi, která se nazývá komprese, se píst pohybuje směrem vzhůru a dochází ke stlačení směsi paliva. V grafu se to projevuje nárůstem tlaku, který začíná nejdříve pozvolna, ale následně velmi strmě narůstat. Oba ventily jsou v této fázi zavřené. Směs je těsně před horní úvratí zapálena jiskrou. Přecházíme do fáze expanze. Oba ventily jsou stále zavřené. Zapálená směs hoří a v pracovním procesu se to projeví ještě dalším zvýšením teploty a tlaku. Z grafu lze vyčíst, že v této fázi roste tlak do svého maxima, tj. na hodnotu okolo 18 [bar]. Pak ale začne strmě klesat zpět dolů. Píst je postupně stlačen dolů a koná práci. Z grafu zjistíme, že když je píst v dolní úvratí, je tlak přibližně konstantní, ale o něco větší než při fázi sání. Poslední fází je fáze výfuku. Píst směřuje do horní úvratě a přes otevřený výfukový ventil vytlačuje spaliny do výfukového potrubí. V grafu je vidět ještě jeden zajímavý tlakový skok, a to je mezi fázemi výfuku a sání.

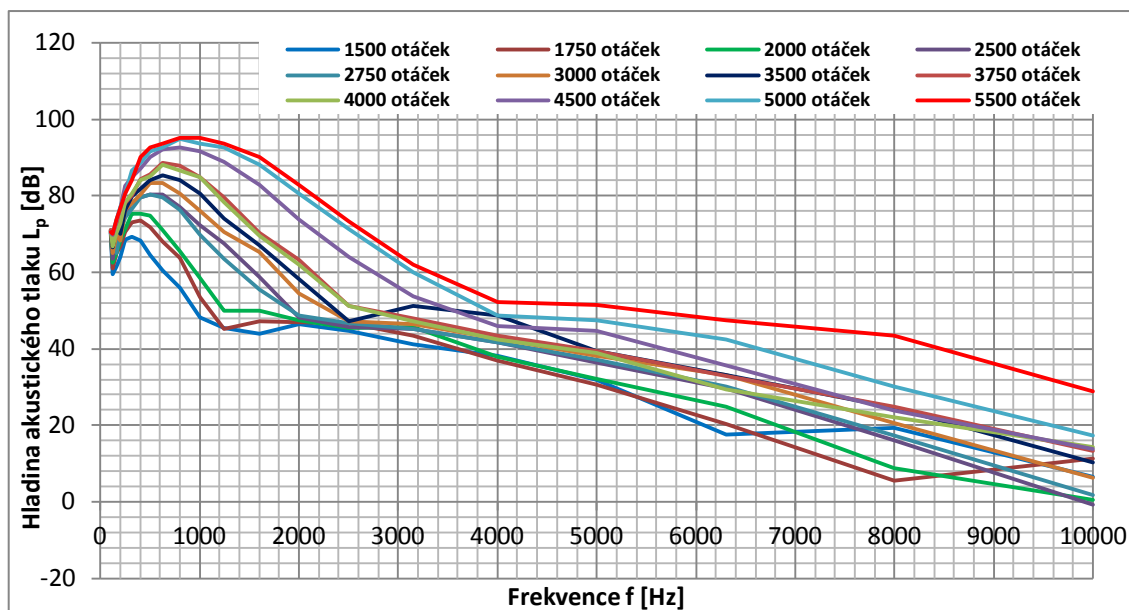


Obrázek 36 Frekvenční spektrum hluku spalování motoru ŠKODA

Následující graf (obrázek 36) znázorňuje křivku hluku spalování právě pro hodnotu otáček 1500 $[\text{min}^{-1}]$. Na spodní ose je zaznamenána frekvence vlnění, na ose kolmé pak hladina akustického tlaku. Graf je vytvořen pomocí počítačového softwaru. Naměřené hodnoty tlaku ve válci při spalování jsou zaznamenány do počítače. Poté projdou přes vhodné filtrace a transformací. Následně už záleží pouze na zvolení vhodného typu analýzy, v našem případě je použita FFT analýza. Více o možných analýzách se můžeme dočíst v kapitole Metody zpracování signálu. Prvním naším cílem bylo zjistit hladinu akustického tlaku z již dříve naměřených hodnot u motoru Škoda 1.2 HTP. Z grafu tedy zjišťujeme, že v oblasti 1000 až 3000 $[\text{Hz}]$, tj. frekvenční oblasti, kdy je lidské ucho nejvíce citlivé, je hluk spalování při nastavených otáčkách maximální. Takto postupně provedeme vyhodnocení s cílem zjištění maximálních hladin akustického tlaku při různém zatěžování uvedeného motoru.

9.2.1. Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách

Toto měření proběhlo postupně celkem pro dvanáct konstantních nastavení otáček. První měření proběhlo při 5500 $[\text{min}^{-1}]$ a postupně byly otáčky snižovány až na hodnotu 1500 $[\text{min}^{-1}]$. Pro každé konstantní nastavení otáček bylo nastaveno i maximální možné zatížení, tj. příslušný maximální krouticí moment. Výsledkem měření je graf na obrázku 37.



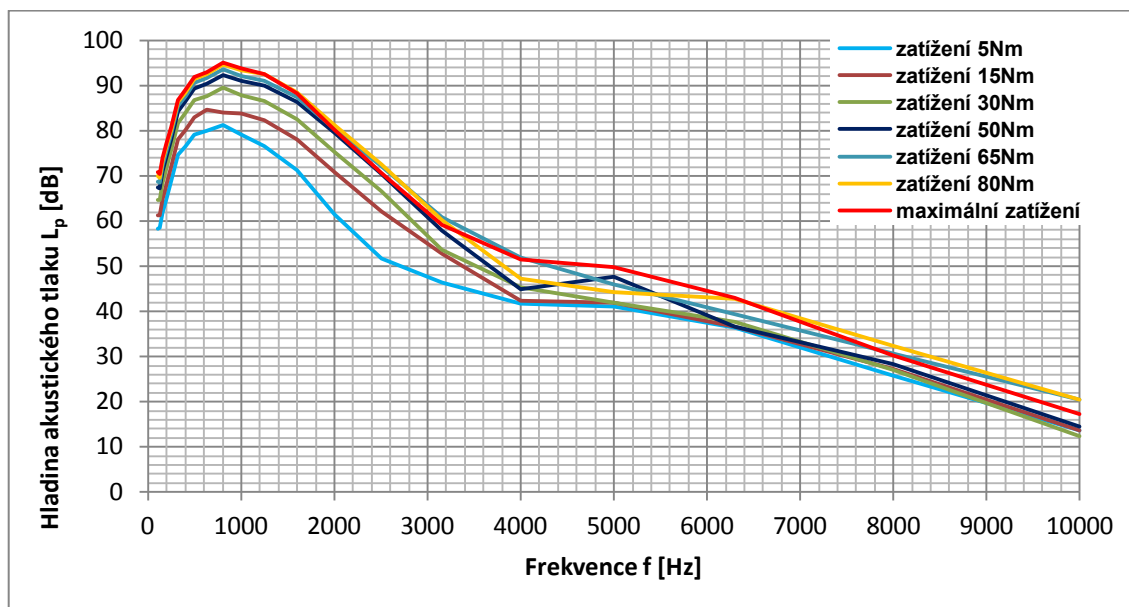
Obrázek 37 Frekvenční spektrum hluku spalování při maximálním zatížení

Při detailním rozboru obrázku 37 zjistíme, že v grafu frekvenčního spektra hluku spalování je vyobrazeno dvanáct různých křivek hluku spalování. Při hledání maximální hodnoty hladiny akustického tlaku je zřejmé, že tato hodnota je největší při maximálních otáčkách, tj. při 5500 [min⁻¹]. Maximální hladina akustického tlaku se nachází v oblasti největší citlivosti lidského ucha a její hodnota je 95,3 [dB]. Při těchto otáčkách jsou v celém frekvenčním rozsahu i největší hodnoty hladiny akustického tlaku. Při dalším zaměření se na graf zjistíme, že všechny křivky jsou velmi tvarově podobné. Dále graf ukazuje, že s klesajícími otáčkami motoru klesají i jednotlivé hladiny akustického tlaku. Nejnížší hodnoty hladiny akustického tlaku jsou zjištěny při nejnižších zvolených otáčkách, tj. při otáčkách 1000 [min⁻¹].

9.2.2. Měření hluku spalování při 5000 otáčkách a různém zatížení

Druhé měření proběhlo při konstantních otáčkách a postupném zatěžování motoru. Otáčky byly nastaveny na hodnotu 5000 [min⁻¹], což je o něco méně než jsou maximální možné otáčky motoru. Při těchto otáčkách byl motor nejdříve zatížen maximálním krouticím momentem a pak byl postupně krouticí moment snižován. Jednotlivé hodnoty krouticího momentu byly pak postupně 80 [Nm], 65 [Nm], 50 [Nm],

30 [Nm], 15 [Nm] a na konec nejmenších 5 [Nm]. Výsledek měření je v grafu na obrázku 38.



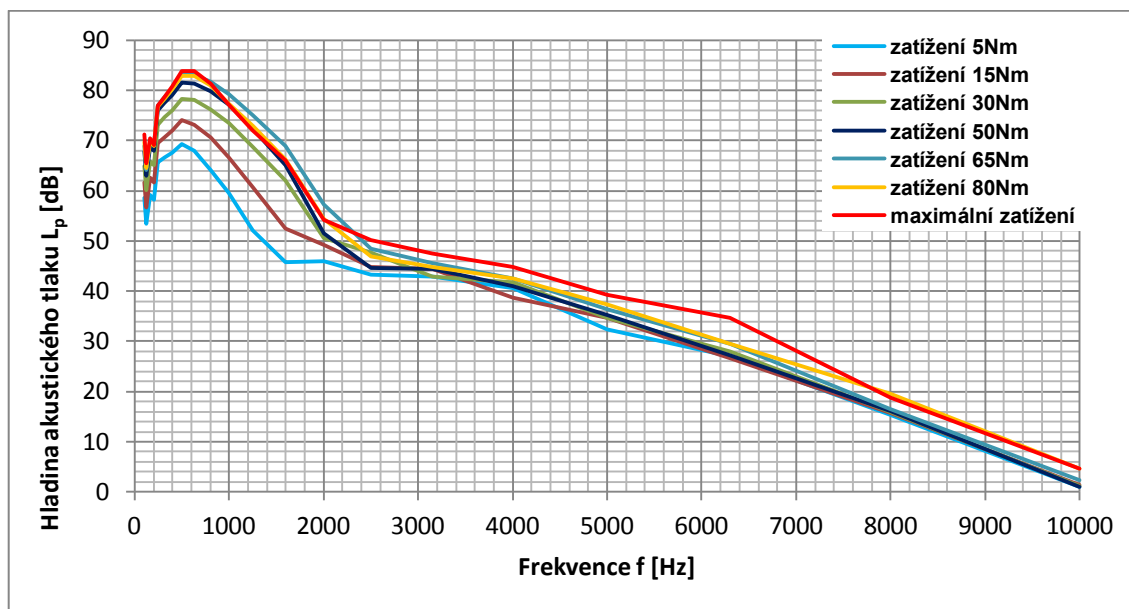
Obrázek 38 Frekvenční spektrum hluku spalování při 5000 otáčkách

Z grafu zjistíme, že maximální hladina akustického tlaku je při největším zatížení motoru a její hodnota je 95,2 [dB]. Maximum pro všechny křivky je na stejné frekvenci, v tomto případě 800 [Hz]. S postupným narůstáním frekvence se zároveň snižuje i hladina akustického tlaku. To platí opět pro každou křivku. Naopak při nejmenším zatížení motoru se pohybuje hladina akustického tlaku v nejnižších hodnotách.

9.2.3. Měření hluku spalování při 3000 otáčkách a různém zatížení

I toto měření proběhlo při konstantních otáčkách a postupném zatěžování motoru. Otáčky byly navoleny na hodnotu 3000 [min⁻¹], což je hodnota, při které je dosaženo maximálního krouticího momentu motoru. Při těchto otáčkách byl motor zatížen stejným způsobem jako v předchozím případě, tedy nejdříve maximálním krouticím

momentem, který byl poté snižován. Jednotlivé hodnoty krouticího momentu byly pak postupně 80 [Nm], 65 [Nm], 50 [Nm], 30 [Nm], 15 [Nm] a na konec nejmenších 5 [Nm]. Hodnoty jsou tedy shodné jako u předchozího měření. Výsledek měření je znázorněn v grafu na obrázku 39.



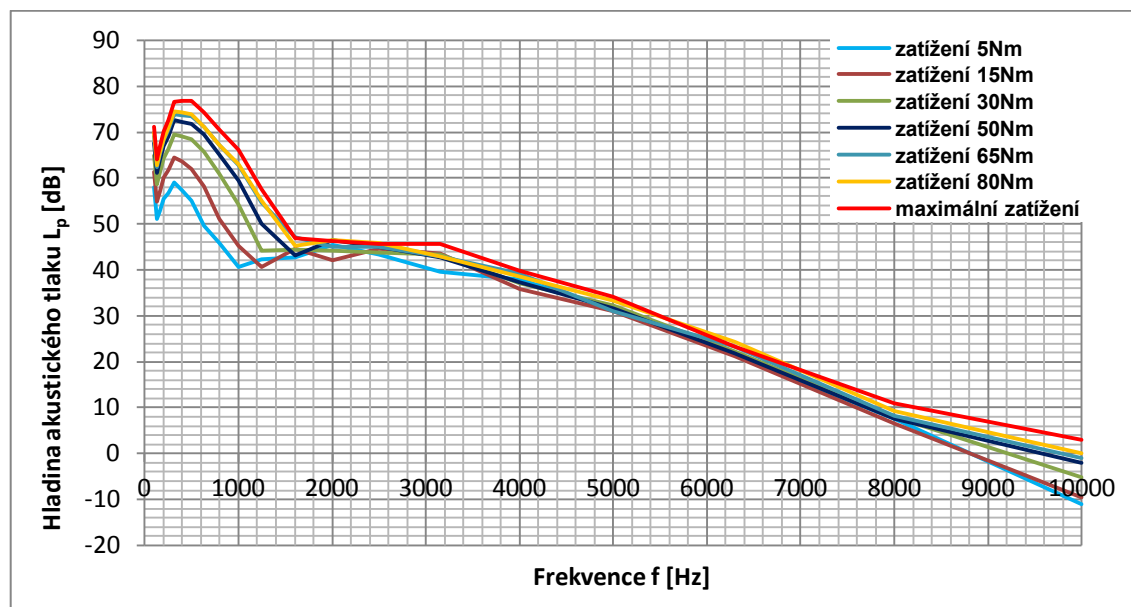
Obrázek 39 Frekvenční spektrum hluku spalování při 3000 otáčkách

Z grafu zjistíme, že maximální hladina akustického tlaku je i v tomto případě při největším zatížení motoru a její hodnota je 83,8 [dB]. Maximum pro všechny křivky je přibližně při frekvenci 500 [Hz]. S postupně narůstající frekvencí se zároveň opět snižuje i hladina akustického tlaku. To platí opět pro každou křivku. Průběh křivek je velmi podobný jako při 5000 otáčkách. Stejně je to i při nejmenším zatížení motoru, i zde jsou nejnižší hodnoty hladiny akustického tlaku při nejmenším zatížení motoru.

9.2.4. Měření hluku spalování při 2000 otáčkách a různém zatížení

Poslední měření motoru Škoda bylo při 2000 [min⁻¹]. I toto měření proběhlo při konstantních otáčkách a postupném zatěžování motoru. Při těchto otáčkách byl motoru zatížen stejným způsobem jako v předchozích dvou případech, tedy nejdříve zatížen

maximálním krouticím momentem, pak byl postupně krouticí moment snižován. Jednotlivé hodnoty krouticího momentu byly pak postupně 80 [Nm], 65 [Nm], 50 [Nm], 30 [Nm], 15 [Nm] a na konec nejmenších 5 [Nm]. Hodnoty jsou tedy shodné jako u obou předchozích měření. Výsledek měření je v grafu na obrázku 40.



Obrázek 40 Frekvenční spektrum hluku spalování při 2000 otáčkách

Z grafu zjistíme, že maximální hladina akustického tlaku je i zde při největším zatížení motoru a její hodnota je 76,8 [dB]. Maximum pro všechny křivky je přibližně při frekvenci 315 [Hz]. S postupným nárůstem frekvence se zároveň opět snižuje i hladina akustického tlaku. To platí opět pro každou křivku. Průběh křivek je velmi podobný, jako při 5000 a 3000 otáčkách. Stejně je to i při nejmenším zatížení motoru, i zde jsou nejnižší hodnoty hladiny akustického tlaku při nejmenším zatížení motoru.

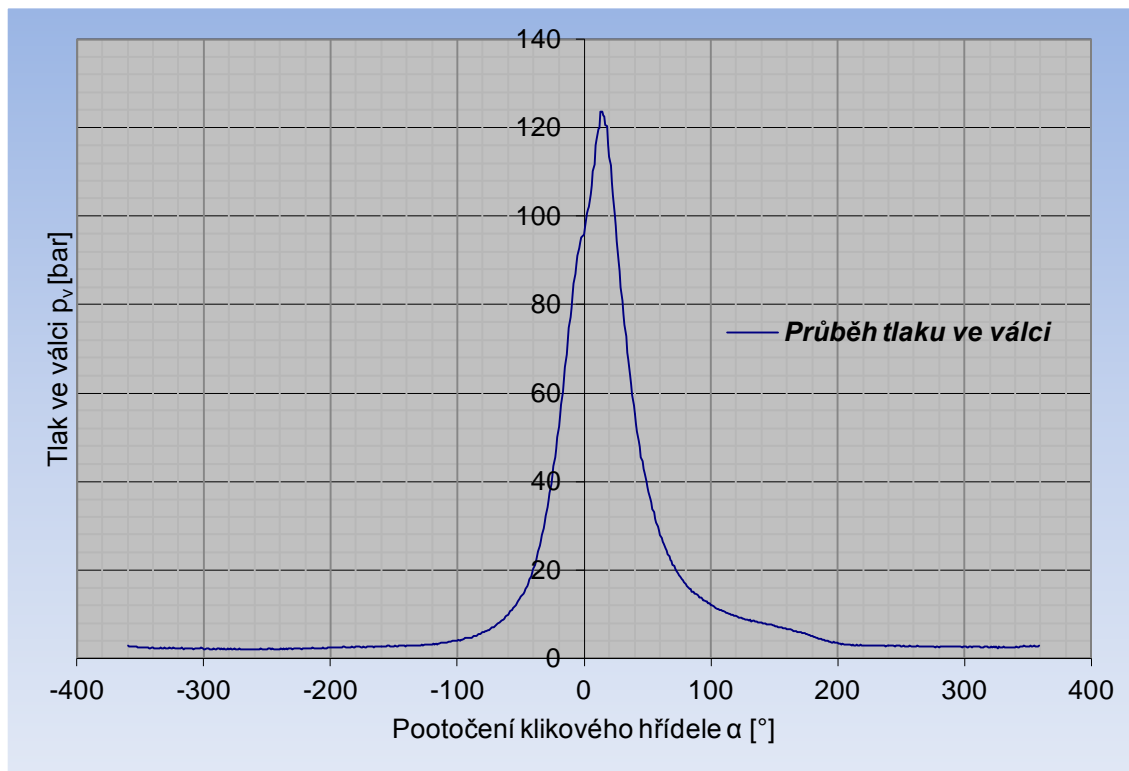
9.2.5. Zhodnocení motoru ŠKODA 1.2 HTP

Srovnáním výsledků, které byly získány z naměřených dat, zjistíme, že největší hodnota hladiny akustického tlaku je při maximálních otáčkách a maximálním zatížení motoru. Maximální hodnota hladiny akustického tlaku je tedy naměřena při 5500 otáčkách a je 95,3 [dB]. Tato hodnota je při hodnotě frekvence přibližně 1000 [Hz].

Když budeme jednotlivé grafy srovnávat, zjistíme, že hodnoty v grafu na obrázku 37 jsou stejné jako hodnoty u ostatních grafů. Hodnoty jsou tedy shodné při stejných otáčkách a maximálním zatížení motoru. Z grafů dále zjišťujeme, že při největších otáčkách motoru dochází k největším změnám hladiny akustického tlaku do frekvence 4000 [Hz]. Od této frekvence už je změna hladiny akustického tlaku lineární. Když se otáčky postupně snižují, snižuje se i frekvenční rozsah, kdy dochází k největším změnám hladiny akustického tlaku. Tak jako například při otáčkách 1000 [min^{-1}] jsou největší změny do 1500 [Hz]. Dále lze podotknout, že při snižujícím se zatížení motoru krouticím momentem se snižuje i hluk spalování. Například při porovnání maximálního a minimálního zatížení při otáčkách 2000 [min^{-1}] zjistíme, že při stejné frekvenci je rozdíl hladiny akustického tlaku necelých 17 [dB]. Obdobně je tomu i u dalších otáček motoru při srovnání minimálního a maximálního zatížení. Při srovnání maximálních hodnot hladin akustického tlaku pro jednotlivé otáčky při maximálním zatížení motoru v grafu na obrázku 37 zjistíme, že rozdíl hladin akustického tlaku mezi maximálními a minimálními otáčkami je přibližně 25 [dB]. Velikost výsledné hladiny akustického tlaku je tedy velmi ovlivněna počtem otáček motoru a zároveň i velikostí zatížení krouticím momentem. Jednotlivé grafy pro různá nastavení motoru při měření hluku spalování jsou součástí přílohy č. 1.

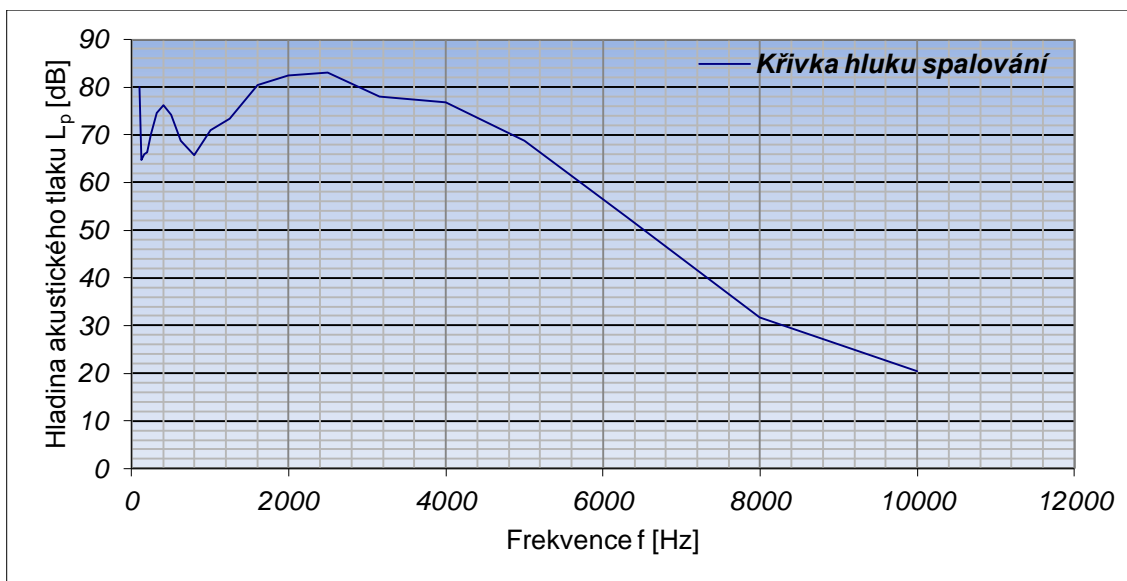
9.3. Motor ZETOR Z 1505

Druhý motor, u kterého byl stejně jako u předchozího motoru měřen tlak ve válci a následně zjištěn hluk spalování, je motor ZETOR Z 1505. Tento kapalinou chlazený vznětový čtyřválec je používán u zemědělských strojů, a to především u traktorů firmy ZETOR. Plnění motoru je zajišťováno turbodmychadlem se vzduchovým mezichlazením. Průměrem válce 105 [mm], zdvihem pístu 120 [mm], maximálním točivým momentem 525 [Nm] při 1400 otáčkách a maximálním výkonem 90 [kW] při 2100 otáčkách se řadí mezi větší motory, více se tedy hodí pro vozidla s potřebným výkonem, především pro stroje zemědělské. Tento fakt je potvrzen i tím, že celkové rozměry motoru jsou větší než rozměry zážehového motoru Škoda. Použití motoru pro osobní automobily je tedy vyloučené. Lze očekávat větší naměřené hodnoty tlaku ve válci tohoto pístového spalovacího motoru, než je tomu u předchozího motoru.



Obrázek 41 Diagram $p - \alpha$ motoru ZETOR

Na obrázku 41 je znázorněn v grafu průběh tlaku ve válci v závislosti na otáčkách klikového hřídele. Na vodorovné ose je opět znázorněno pootočení klikového hřídele, na ose svislé zase velikost příslušného tlaku ve válci. Měření proběhlo stejným způsobem jako u předchozího motoru s výjimkou počtu otáček. V případě motoru Zetor byly otáčky pro tento průběh tlaku nastaveny na hodnotu $1480 \text{ [min}^{-1}\text{]}$. Tento graf vznikl zprůměrováním ze 150 cyklů právě při uvedených otáčkách. Pokud sledujeme průběh tlaku ve válci motoru, zjistíme, že má tlak obdobný průběh jako u předchozího motoru. Jsou zde ale tři odlišnosti. Zaprvé se tlak pohybuje v daleko větších hodnotách než u motoru Škoda. Druhá odlišnost je ve fázi komprese, kdy při její závěrečné fázi dojde vlivem teploty a stále se zvětšujícího tlaku u vznětových motorů k zapálení směsi. V této části fáze lze vidět menší skok v průběhu tlaku. Následně dojde ke zvýšení tlaku až na maximální hodnotu, v tomto případě na přibližných 124 [bar] . Třetí odlišností v grafu je absence tlakového skoku mezi fází výfuku a fází sání, resp. tlakový skok je v porovnání s motory zážehovými zanedbatelný. Takto byl tlak změřen při všech provedených měření pro 150 cyklů. Ze změřených hodnot tlaku pak pomocí výpočetní techniky získáme frekvenční spektrum hluku spalování.

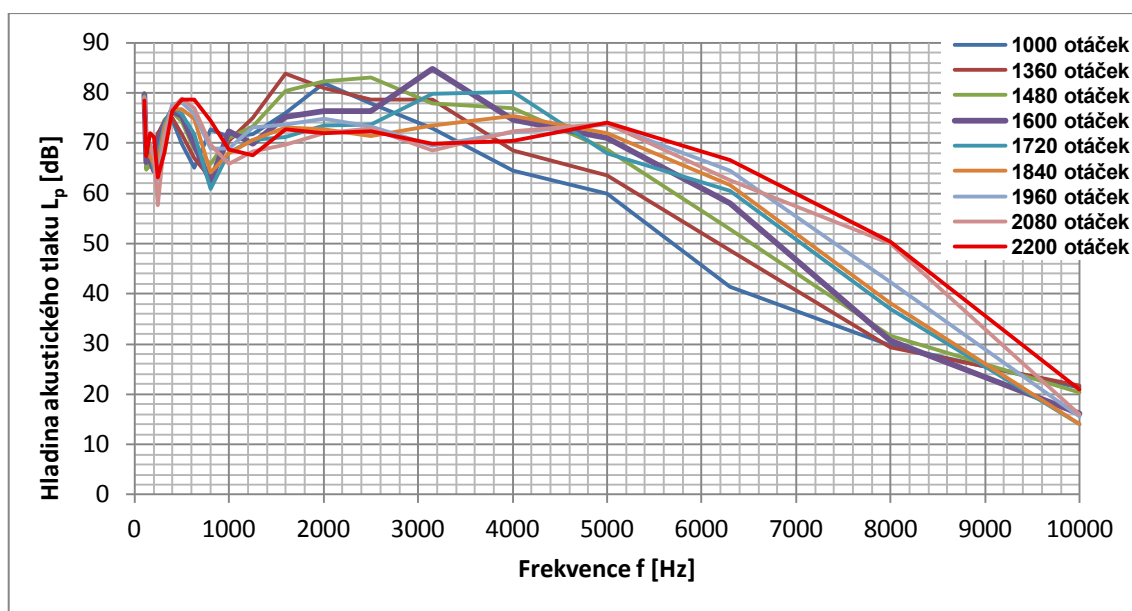


Obrázek 42 Frekvenční spektrum hluku spalování motoru ZETOR

Obrázek 42 je příklad grafu, který opět znázorňuje frekvenční spektrum hluku spalování pro hodnoty tlaku, které jsou viditelné na obrázku 41. Na spodní ose je frekvence vlnění, na ose kolmé pak hladina akustického tlaku. Graf je vytvořen opět úplně stejným způsobem jako u předchozího měření. Cílem našeho druhého a zároveň posledního měření je tedy zjistit maximální hladinu akustického tlaku u motoru Zetor při různém zatěžování.

9.3.1. Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách

První měření proběhlo postupně celkem pro devět nastavení konstantních otáček. Otáčky byly voleny od 2200 [min⁻¹] a postupně snižovány až na hodnotu 1000 [min⁻¹]. Pro každé konstantní otáčky bylo maximální možné zatížení, tj. příslušný maximální krouticí moment. Výsledkem měření je graf na obrázku 43.

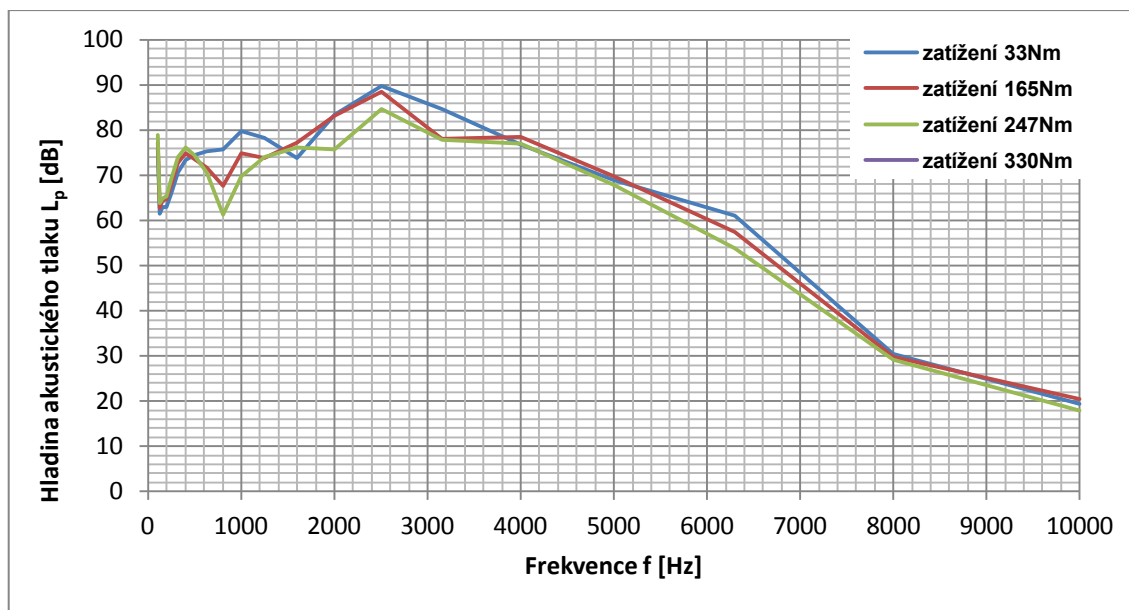


Obrázek 43 Frekvenční spektrum hluku spalování při maximálním zatížení

Z grafu lze zjistit, že maximální hladina akustického tlaku je v oblasti nejvyšší citlivosti lidského ucha při 1600 $[\text{min}^{-1}]$. Křivka je vyznačena pro lepší orientaci tučněji. Hodnota maximálního akustického tlaku je 84,8 [dB]. Naopak nejnižší hodnoty v této oblasti jsou naměřeny při otáčkách, které se blíží maximálním otáčkám motoru. Při pohledu na graf také zjistíme, že v oblasti nízké frekvence je maximum hladiny akustického tlaku při maximálních otáčkách motoru. A stejně je tomu tak i při vysokých frekvencích.

9.3.2. Měření hluku spalování při 2200 otáčkách a různém zatížení

Další měření proběhlo při konstantních otáčkách a postupném zatěžování motoru. Otáčky byly zvoleny na hodnotu 2200 $[\text{min}^{-1}]$, což jsou i maximální možné otáčky motoru. Při těchto otáčkách byl motor nejdříve zatížen velkým krouticím momentem 330 [Nm] a pak byl motor postupně zatěžován menšími krouticími momenty 247 [Nm], 165 [Nm] a nakonec 33 [Nm]. Výsledek měření je zaznamenán v grafu na obrázku 44.

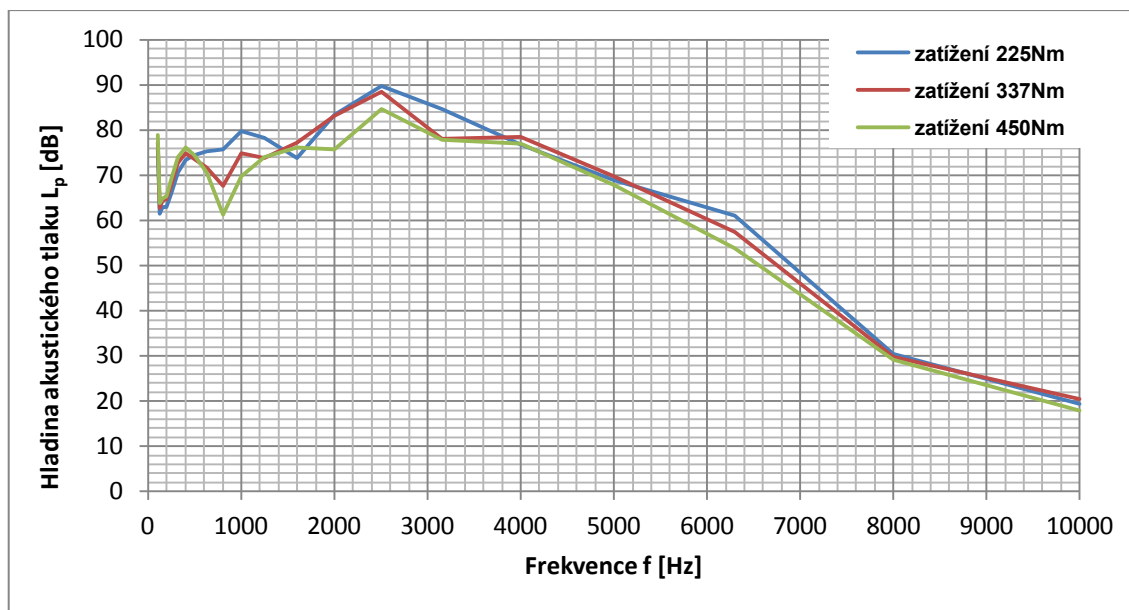


Obrázek 44 Frekvenční spektrum hluku spalování při 2200 otáčkách

Z grafu zjistíme, že maximální hladina akustického tlaku je při nejmenším zatížení motoru a její hodnota je 81,6 [dB]. S rostoucí frekvencí se ale hladina akustického tlaku postupně snižuje, až zjistíme, že při vysokých frekvencích jsou hodnoty akustického tlaku nejnižší právě při nejmenším zatížení motoru. V oblasti středních frekvencí jsme naopak zjistili, že nejmenší hodnoty hladiny akustického tlaku jsou při maximálním zatížení motoru.

9.3.3. Měření hluku spalování při 1480 otáčkách a různém zatížení

Poslední měření proběhlo obdobným způsobem jako měření předchozí. Hodnota otáček byla 1480 [min⁻¹] a motor byl postupně zatěžován krouticím momentem 450 [Nm], dále 337 [Nm] a nakonec 225 [Nm]. Obrázek 45 zobrazuje graf ze zjištěných hodnot měření.



Obrázek 45 Frekvenční spektrum hluku spalování při 1480 otáčkách

Z grafu lze zjistit, že při největším zatížení motoru, tj. při zatížení 450 [Nm], se hladina akustického tlaku v celém frekvenčním rozsahu pohybuje v nejnižších hodnotách. Naopak při nejnižším zatížení motoru, tedy při hodnotě 225 [Nm], se pohybuje hladina akustického tlaku v nejvyšších hodnotách. To platí opět prakticky pro celý frekvenční rozsah. Maxima je dosaženo ve středních hodnotách frekvence a zjištěné maximum je 89,8 [dB].

9.3.4. Zhodnocení motoru ZETOR Z1505

Při srovnání výsledků, které byly získány z naměřených dat u motoru ZETOR, zjistíme, že největší hodnota hladiny akustického tlaku není při maximálních otáčkách a maximálním zatížení motoru, jako tomu bylo u motoru Škoda. Maximální hodnota hladiny akustického tlaku je v tomto případě naměřena při 1480 otáčkách a její hodnota je 89,8 [dB]. V tomto případě byl motor zatížen 225 [Nm]. Naopak při větším zatížení motoru, tj. 450 [Nm] zjistíme maximální hodnotu 84,6 [dB]. Obě hodnoty jsou při hodnotě frekvence 2500 [Hz]. Když se zaměříme na graf na obrázku 43, zjistíme, že jednotlivé křivky hluku spalování mají velmi podobné průběhy. Největší hodnota hladiny akustického tlaku je zjištěna při 1600 otáčkách a její velikost je 84,8 [dB]. Toto maximum je při frekvenci okolo 3000 [Hz]. S nárůstem otáček postupně klesá při této frekvenci i hladina akustického tlaku. Při maximálních otáčkách byla zjištěna hodnota

69,8 [dB]. Vše bylo změřeno při maximálním zatížení motoru. Při nižších frekvencích jsou jednotlivé velikosti hladin akustického tlaku velmi podobné. U vysokých frekvencí tomu už tak není, jsou zde velké rozdíly mezi jednotlivými křivkami. Nejnížší hodnoty hladin akustického tlaku jsou v této oblasti při nejnižších otáčkách, naopak nejvyšší hodnoty hladin akustického tlaku jsou při maximálních otáčkách. V grafu na obrázku 44 jsou hodnoty hladin akustického tlaku při 2200 otáčkách a různých hodnotách zatížení motoru. I v tomto případě je maximální hladina akustického tlaku největší při nejmenším zatížení motoru a její hodnota je 81,6 [dB]. Při pohledu na výsledky lze říci, že k nejvýznamnějším změnám hodnot hladin akustického tlaku dochází u frekvence do 2000 [Hz]. V případě tohoto motoru má tedy velmi významný vliv na výsledky měření velikost příslušného zatížení. Jednotlivé grafy pro různá nastavení motoru při měření hluku spalování jsou součástí přílohy č. 2.

10. Závěr

Na základě provedeného experimentu a vyhodnocení jeho výsledků lze dojít k následujícím závěrům.

U motoru ŠKODA byla zjištěna maximální hladina akustického tlaku při spalování 95,3 [dB] a tato hodnota je vyšší než u motoru ZETOR. Maximální hodnota byla naměřena při největším zatížení a maximálních otáčkách motoru.

U druhého měření, motoru ZETOR, byla jako maximální hodnota hladiny akustického tlaku při spalování vyhodnocena na 89,8 [dB]. V tomto případě se ale nejednalo o hodnotu zjištěnou při maximálních otáčkách motoru. Tato hodnota byla naměřena při 1480 otáčkách a nejmenším zatížení motoru, v našem případě při zatížení 225 [Nm].

Srovnávat oba motory vzájemně nemá většího významu, protože oba motory jsou navzájem odlišné. Co lze konstatovat, že u zážehového motoru je hladina akustického tlaku při maximálních otáčkách. U motoru vznětového motoru tomu tak není.

Hluk u spalovacích motorů bude vždy při procesu spalování přítomen. V současné době neexistují žádné možnosti, jak hluk účelně eliminovat. Můžeme se tedy alespoň pokusit ho částečně utlumovat. Jedním ze způsobů, jak hluk úspěšně eliminovat, je použití kvalitního zakrytování motoru. Motor musí být dále také dobře upevněn k nosné karosérii. Současně v dnešní době existuje také mnoho moderních tlumících hmot nebo povlaků.

Hlukové zkoušky automobilů jsou důležitou součástí každé výroby. S rozvojem doby bude docházet ke stálému zlepšování jednotlivých metod měření hluku ať už při měření hluku celého vozidla nebo motoru samotného, především je ale trendem hluk vydávaný vozidlem snižovat v maximální míře. Hlukové vlastnosti jsou jedním z rozhodujících faktorů majících vliv na konkurenceschopnost vozidla na trhu.

Seznam zdrojů

1. **Smetana, Ctirad a kol., a.** *Hluk a vibrace*. Praha : Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-90 1936-2-5.
2. **Němeček, Pavel.** Studenti/Akustická diagnostika In - TECH: Katedra vozidel a motorů. *Web Katedra vozidel a motorů*. [Online] 2012. [Citace: 29. Listopad 2012.] <http://www.kvm.tul.cz/>.
3. **Gottvaldová, Jana.** Automobilový hluk. *SILNICEŽELEZNICE*. Zajímavosti, Březen 2011, 3/2011.
4. **Havránek, J a kol., a.** *Hluk a zdraví*. Praha : Avicenum, 1990. ISBN 8020100202.
5. **Evropská hospodářská komise.** Čeština/Právo EU: Europa. *Web Europa*. [Online] 2013. [Citace: 10. Duben 2013.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:137:0068:0115:cs:PDF>.
6. **Koštál, Jan.** *Pístové spalovací motory*. Praha : Československá akademie věd, 1963. ISBN 21-039-63.
7. **Vysoké učení technické v Brně.** Fakulta strojního inženýrství/Fakulta/Pracoviště//stavy/Energetický ústav/Odbor termomechaniky a techniky prostředí. *Web Vysoké učení technické v Brně*. [Online] 2011. [Citace: 10. Červen 2012.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka05-02.htm>.
8. **Kreidl, Marcel a Šmíd, Radislav.** *Technická diagnostka: senzory, metody, analýza signálu*. Praha : BEN, 2006. ISBN 80-730-0158-6.
9. **Jiříček, Ondřej.** *Úvod do akustiky*. Praha : ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1.
10. **Nový, Richard.** *Hluk a chvění*. Praha : ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02243-3.
11. **Elektroakustika.** Historické mikrofony/Elektromechanické principy mikrofonu: Elektroakustika. *Web Elektroakustika*. [Online] [Citace: 21. Březen 2013.] http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html.
12. **Brothánek, Marek, Jandák, Vojtěch a Ondřej, Jiříček.** Otevřená věda/Aktivity/Kurzy/Materiály pro účastníky kurzu. *Web Otevřená věda*. [Online] [Citace: 1. Únor 2013.] http://archiv.otevrena-veda.cz/users/image/default/C1Kurzy/Fyzika/21_jiricek.pdf.
13. **Český normalizační institut.** *Web Normy. Starší normy/1994 únor/ČSN IEC 651*. [Online] 6. Leden 2013. [Citace: 10. Květen 2013.] <http://shop.normy.biz/detail/15470>.
14. **Český normalizační inst.** *Starší normy/1996 listopad/ČSN EN 61183: Normy. Web Normy*. [Online] 6. Leden 2013. [Citace: 10. Květen 2013.] <http://shop.normy.biz/detail/20374>.
15. **Schwarz, Daniel.** *Lineární a adaptivní zpracování dat*. Brno : CERM, 2012. ISBN 978-80-7204-779-6.
16. **Tůma, Jiří.** *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Štramberk : Sělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
17. **Šmíd, Radislav.** ČVUT/Fakulta elektrotechnická: Katedra měření. *Web Katedra Měření*. [Online] 9. Srpen 2001. [Citace: 25. Duben 2013.] <http://measure.feld.cvut.cz/groups/diag/download/Wavelet-intro8859.pdf>.
18. **Blažek, Josef.** Studenti/Skripta a texty on-line/Měření tlaku: Katedra vozidel a motorů. *Web Katedra vozidel a motorů*. [Online] 2012. [Citace: 21. Leden 2013.] www.kvm.tul.cz.
19. **Brüel & Kjær.** On-line katalog: Spectris Praha spol. s r.o. *Web Spectris Praha spol. s r.o.* [Online] 16. Leden 2009. [Citace: 8. Říjen 2012.] <http://www.e-pages.dk/bruel/60/>.

20. **Disk.** RODE/Mikrofony video/NTG-3: Web Disk. *Web Disk*. [Online] [Citace: 20. Duben 2013.] <http://www.disk.cz/disk/detail1.csp?!PV,3929,IPVS,3929>.
21. **Bernat, Petr.** Anatomie varhan/Píšťaly/Akustika: Anatomie varhan. *Web Anatomie varhan*. [Online] 2. Leden 2010. [Citace: 2. Květen 2012.] www.anatomie-varhan.cz.
22. **Němeček, Pavel.** Studenti/Skripta a texty on-line/Akustická diagnostika - In - TECH: Katedra vozidel a motorů. *Web Katedra vozidel a motorů*. [Online] 2012. [Citace: 22. Leden 2013.] <http://www.kvm.tul.cz/>.
23. **Automotors cars.** Rubriky/Spařovací motor: Automotors cars. *Web Automotors cars*. [Online] [Citace: 20. Leden 2013.] Upraveno. <http://motors.mypage.cz/menu/spalovaci-motor>.
24. **OROS Measuring noise&vibration.** Software/Acoustics Analysis/Sound Power: OROS Measuring noise&vibration. *Web OROS Measuring noise&vibration*. [Online] [Citace: 6. Září 2012.] <http://www.oros.com/3905-sound-power.htm>.
25. **AMF Podhledové systémy.** Témata/Akustika: AMF Podhledové systémy. *Web AMF Podhledové systémy*. [Online] 6.1, 15. Leden 2013. [Citace: 20. Leden 2013.] <http://www.amf-cz.cz/cze/akustika.htm>.
26. **AVL Group.** Pressure sensors for combustion analysis/Press and Events/International events: AVL. *Web AVL*. [Online] 2012. [Citace: 4. Květen 2013.] https://www.avl.com/c/document_library/get_file?uuid=5c7f1865-39d4-47f6-86c8-e98fd55e28e8&groupId=10138.
27. **BD Sensors.** Unternehmen/Produkt - News: BD Sensors. *Web BD Sensors*. [Online] 2012. [Citace: 2. Květen 2013.] <http://www.bdsensors.de/unternehmen/produkt-news/>.
28. **Kistler measure, analyse, innovate.** Online Support/Downloads/Brochures, Catalogues: Kistler measure, analyse, innovate. *Web Kistler measure, analyse, innovate*. [Online] 2013. [Citace: 24. Duben 2013.] <http://www.kistler.com/cz/en/support/downloads/catalogues>.
29. **ČVUT Fakulta strojní.** ČVUT: Fakulta strojní. *Web ČVUT Fakulta strojní*. [Online] 9. Květen 2013. [Citace: 24. Duben 2013.] Upraveno. <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/Zdroje%20hluku-No.pdf>.
30. **AVL Group.** Sensors and signal conditioning/Press and Events/International events: AVL. *Web AVL*. [Online] AVL, Únor 2010. [Citace: 4. Květen 2013.] <https://www.avl.com/crank-angle-encoder>.
31. **Brüel & Kjær.** Brüel & Kjær/Zvukoměry/Zvukoměr 2270: Spectris Praha spol. s r.o. *Web Spectris Praha spol. s r.o.* [Online] Grafické studio JZD, Leden 2009. [Citace: 8. Říjen 2012.] <http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/produkty/zvukomery/zvukomer-2270/>.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 ZVUKOVÉ HLADINY (26)	12
OBRÁZEK 2 SPALOVACÍ MOTOR (24)	23
OBRÁZEK 3 POLE PŘÍMÝCH A ODRAŽENÝCH VLN (7)	26
OBRÁZEK 4 ČÁST INTENZITNÍ SONDY (8)	27
OBRÁZEK 5 METODA MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY (25)	29
OBRÁZEK 6 ROZDĚLENÍ PLOCH PŘI MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY (9)	30
OBRÁZEK 7 POHYB SONDY PŘI MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY (9)	31
OBRÁZEK 8 BLOKOVÉ SCHÉMA ZVUKOMĚRU (12)	32
OBRÁZEK 9 RUČNÍ ZVUKOMĚR B&K 2270 (20)	33
OBRÁZEK 10 ŘEZ REÁLNÝM MIKROFONEM (11)	33
OBRÁZEK 11 PŘÍKLADY MIKROFONŮ (19)	34
OBRÁZEK 12 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MIKROFONU (19)	34
OBRÁZEK 13 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA MIKROFONU (21)	35
OBRÁZEK 14 KŘIVKY KONSTANTNÍ HLASITOSTI (22)	35
OBRÁZEK 15 STANDARDIZOVANÉ VÁHOVÉ KŘIVKY (23)	36
OBRÁZEK 16 PŘÍKLAD RUČNÍHO ZVUKOMĚRU B&K 2270 (20)	38
OBRÁZEK 17 BLOKOVÉ SCHÉMA INTENZITNÍ SONDY (8)	39
OBRÁZEK 18 INTENZITNÍ SONDA (19)	39
OBRÁZEK 19 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ	41
OBRÁZEK 20 KŘIVKA MORLETOVA (17)	43
OBRÁZEK 21 KŘIVKA MEXICAN HAT (17)	43
OBRÁZEK 22 KŘIVKA MEYEROVA (17)	43
OBRÁZEK 23 GRAF FREKVENČNÍ ANALÝZY CPB (23)	44
OBRÁZEK 24 GRAF FREKVENČNÍ ANALÝZY FFT (23)	45
OBRÁZEK 25 PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ NECHLAZENÝ (27)	47
OBRÁZEK 26 PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ CHLAZENÝ (27)	48
OBRÁZEK 28 UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ VYSOKOTLAKÉ INDIKACE (18)	48
OBRÁZEK 27 UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ NÍZKOTLAKÉ INDIKACE (29)	48
OBRÁZEK 29 PIEZORESISTIVNÍ SNÍMAČ (28)	49
OBRÁZEK 30 SNÍMAČ OTÁČEK KLIKOVÉHO HŘÍDELE (31)	49
OBRÁZEK 31 MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC TLAKU SPALOVÁNÍ (18)	50
OBRÁZEK 32 VÝSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ TLAKU SPALOVÁNÍ (18)	51
OBRÁZEK 33 PŘIPOJENÍ SNÍMAČŮ K MOTORU (30)	52
OBRÁZEK 34 ZÁZNAM TLAKU VE VÁLCI PRO 150 CYKLŮ (18)	53
OBRÁZEK 35 DIAGRAM P – A MOTORU ŠKODA	54
OBRÁZEK 36 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ MOTORU ŠKODA	56
OBRÁZEK 37 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI MAXIMÁLNÍM ZATÍŽENÍ	57
OBRÁZEK 38 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI 5000 OTÁČKÁCH	58
OBRÁZEK 39 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI 3000 OTÁČKÁCH	59
OBRÁZEK 40 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI 2000 OTÁČKÁCH	60
OBRÁZEK 41 DIAGRAM P – A MOTORU ZETOR	62
OBRÁZEK 42 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ MOTORU ZETOR	63
OBRÁZEK 43 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI MAXIMÁLNÍM ZATÍŽENÍ	64
OBRÁZEK 44 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI 2200 OTÁČKÁCH	65
OBRÁZEK 45 FREKVENČNÍ SPEKTRUM HLUKU SPALOVÁNÍ PŘI 1480 OTÁČKÁCH	66

Seznam rovnic

1 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉ VELIČINY	14
2 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉ VELIČINY	14
3 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU	15
4 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉ RYCHLOSTI	15
5 VÝPOČET RYCHLOSTI ZVUKU	16
6 VÝPOČET AKUSTICKÉHO VÝKONU	16
7 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU	17
8 VÝPOČET INTENZITY ZVUKU	17
9 VÝPOČET INTENZITY ZVUKU	17
10 VÝPOČET HLADINY INTENZITY ZVUKU	18
11 VÝPOČET AKUSTICKÉHO TLAKU	27
12 VÝPOČET AKUSTICKÉ RYCHLOSTI	27
13 VÝPOČET INTENZITY ZVUKU	27
14 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU	28
15 VÝPOČET AKUSTICKÉHO VÝKONU	28
16 VÝPOČET AKUSTICKÉHO VÝKONU	29
17 VÝPOČET AKUSTICKÉHO VÝKONU	30
18 VÝPOČET AKUSTICKÉHO VÝKONU	31
19 VÝPOČET STŘEDU PROPUSTNÉHO PÁSMU	44
20 VÝPOČET STŘEDU PROPUSTNÉHO PÁSMU	45
21 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO NÁBOJE	47
22 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO NÁBOJE	47
23 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ	47

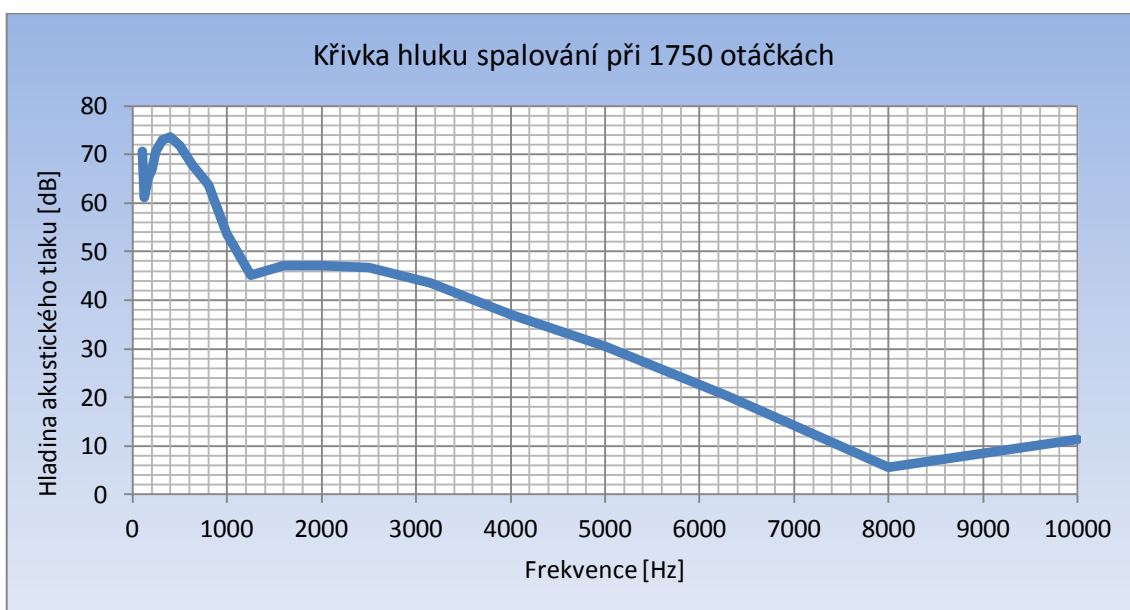
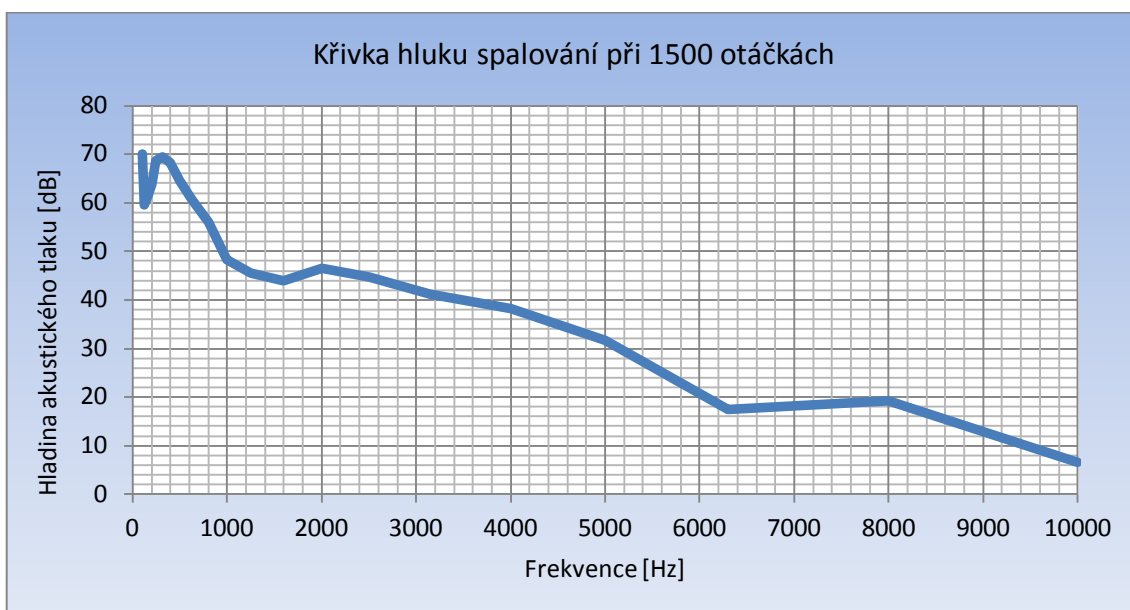
Seznam tabulek

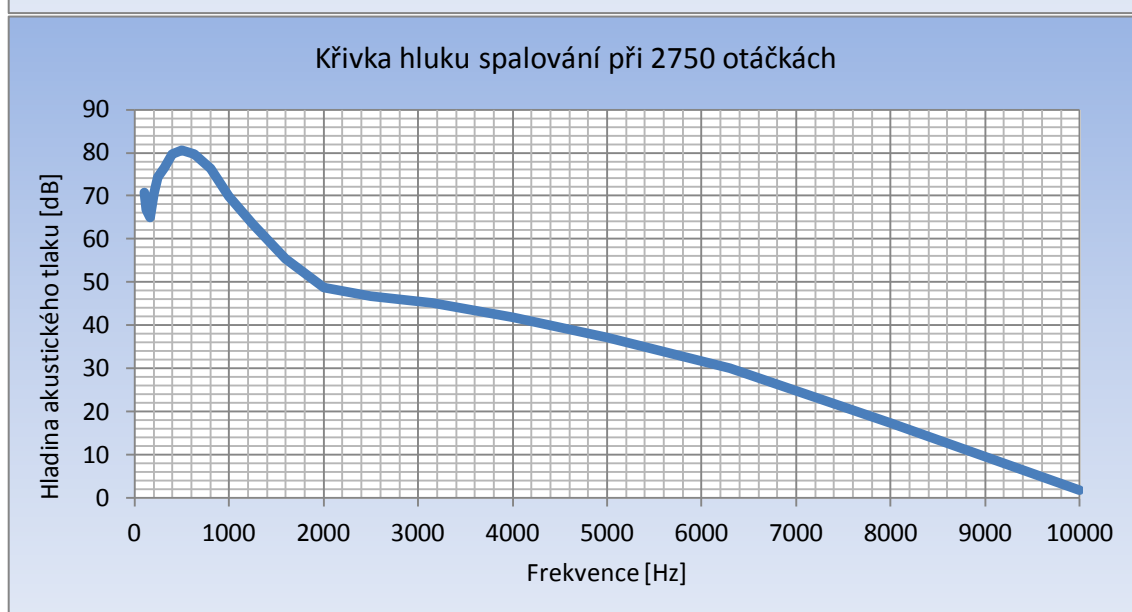
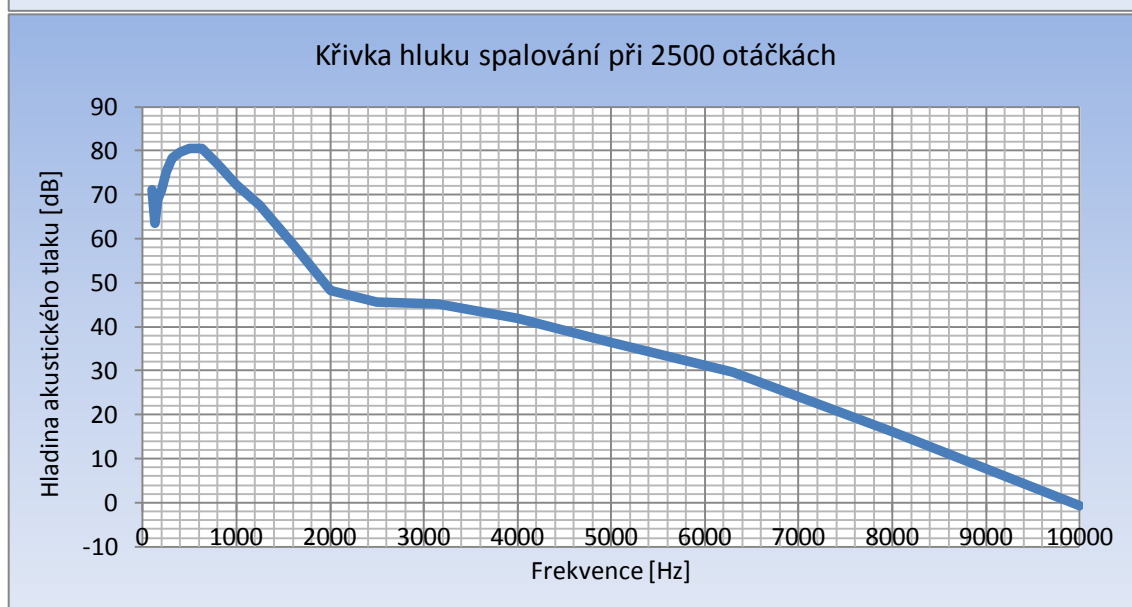
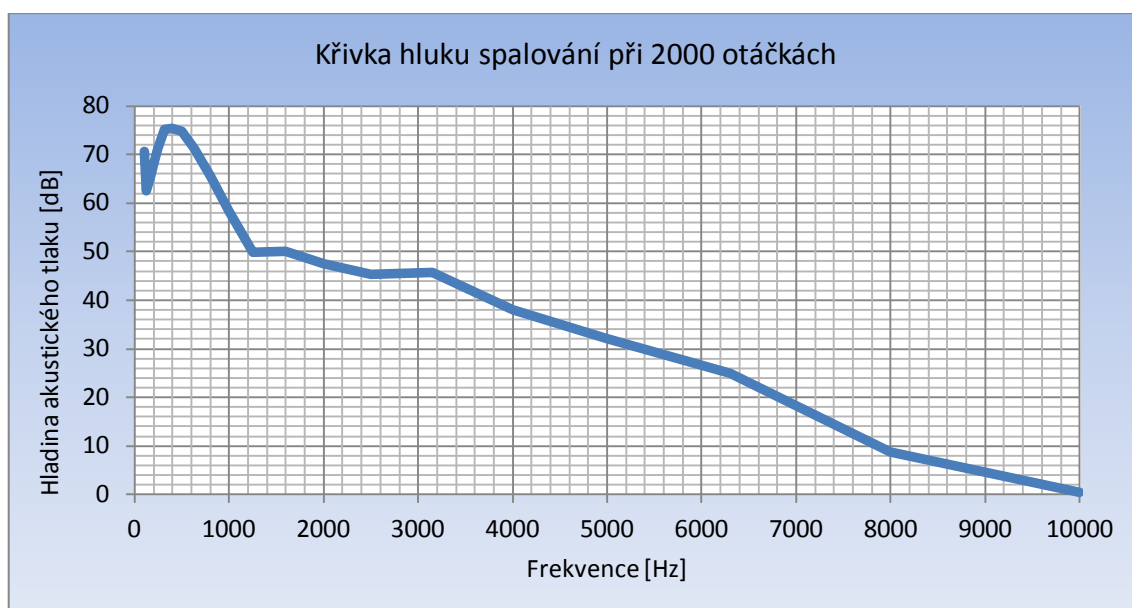
TABULKA 1 LIMITY MAX. POVOLENÉHO VNĚJŠÍHO HLUKU SILNIČNÍCH VOZIDEL PODLE EHK (5)	22
TABULKA 2 TŘÍDY PŘESNOSTI ZVUKOMĚŘŮ (13)	37

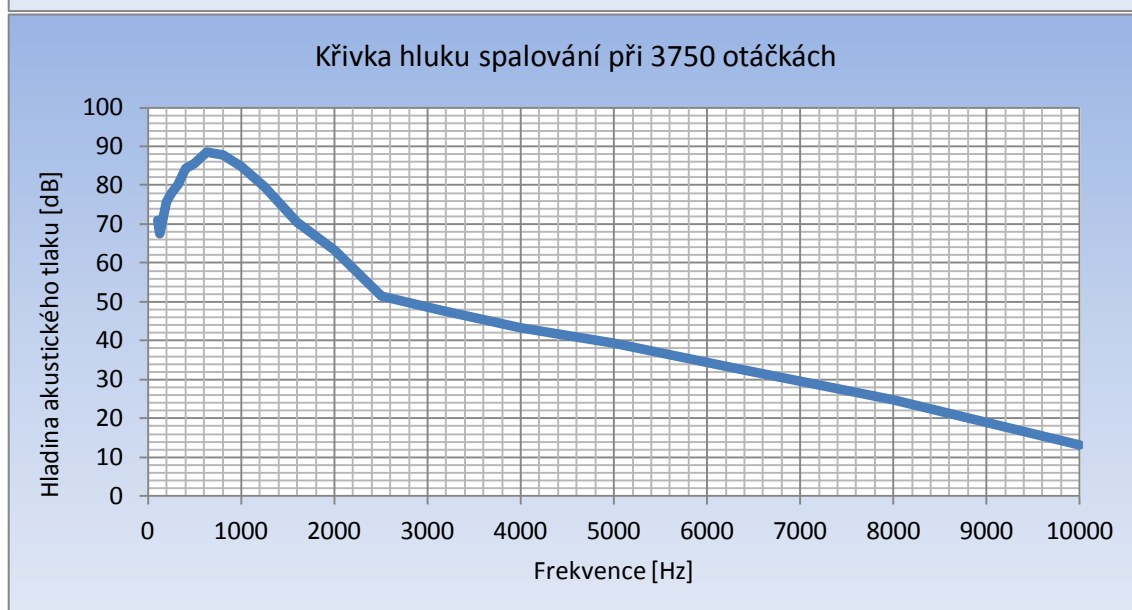
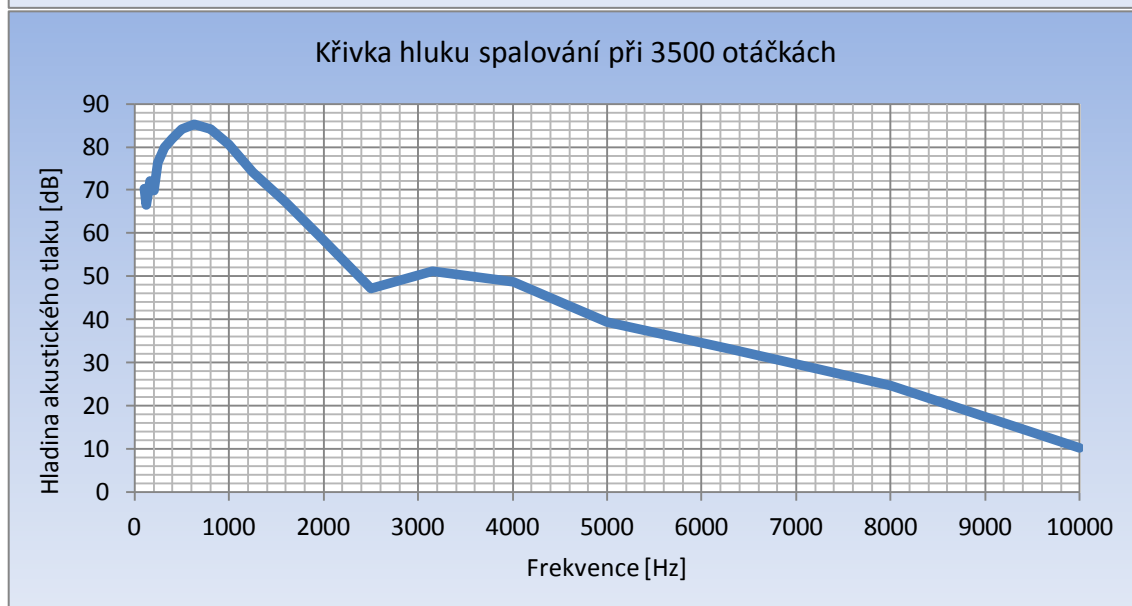
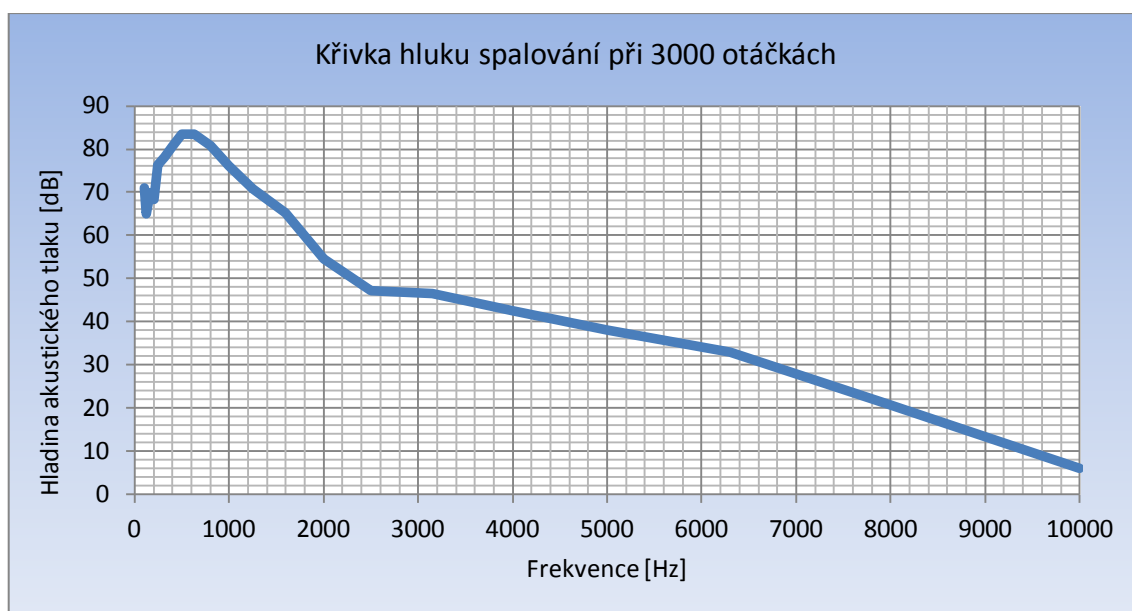
Přílohy

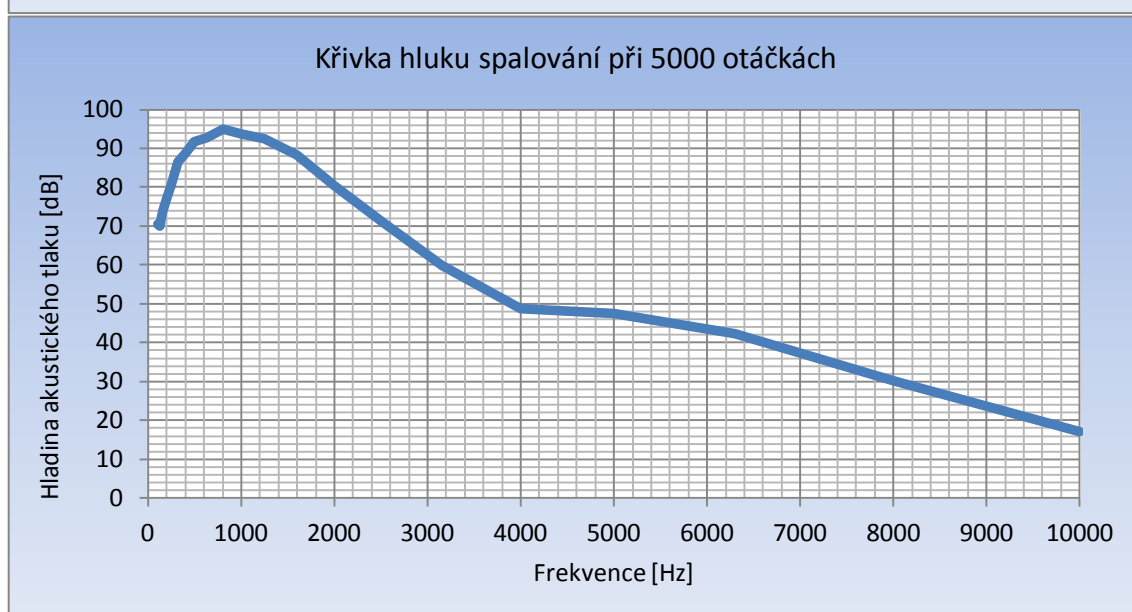
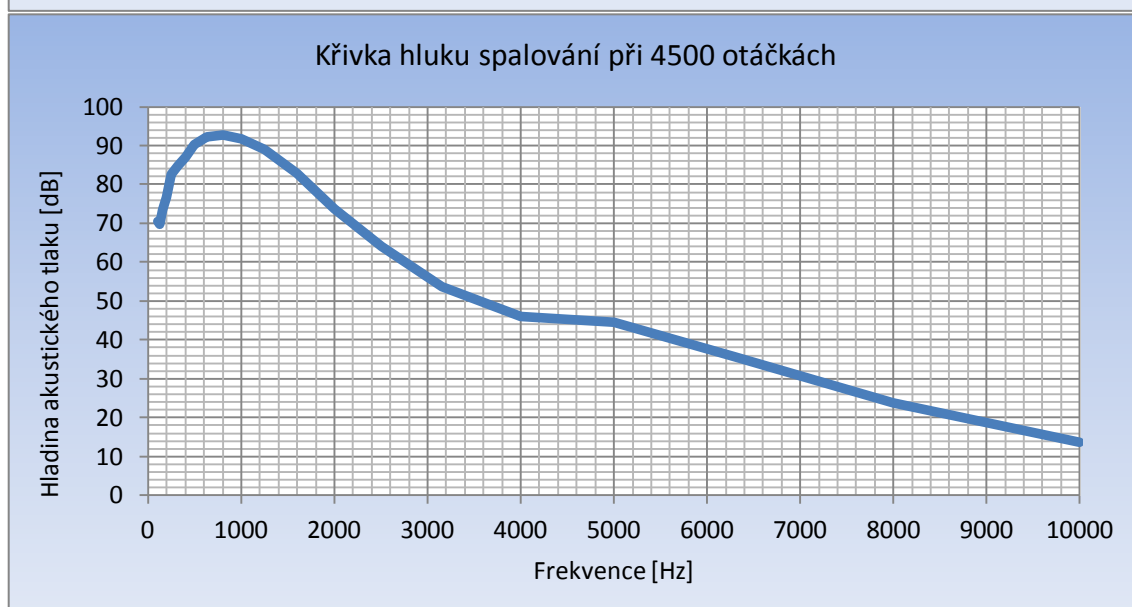
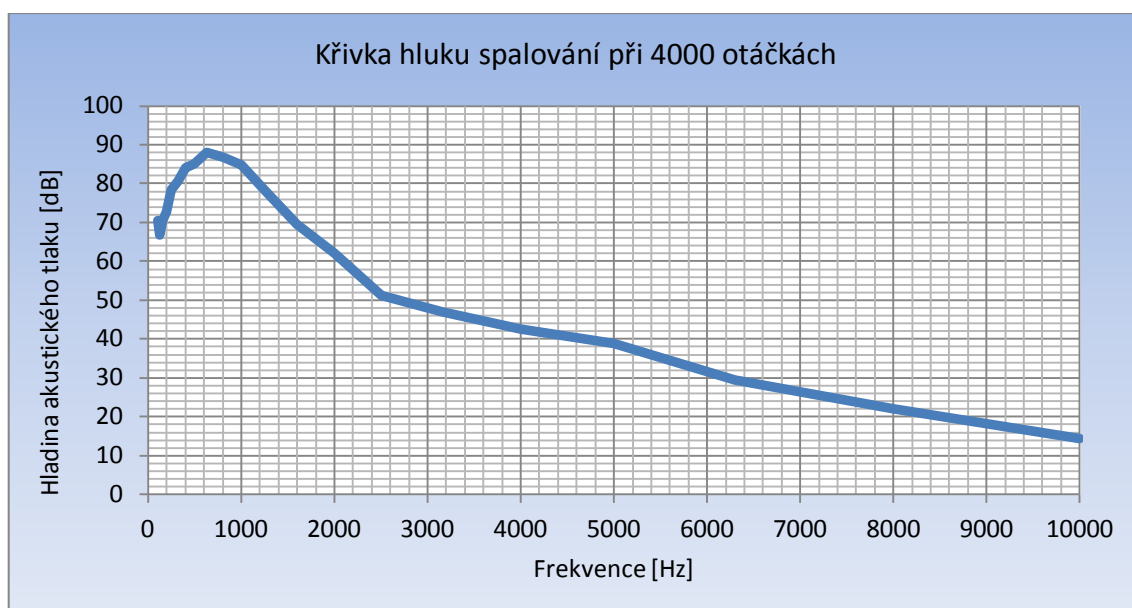
Příloha č. 1 Výsledky jednotlivých měření hluku spalování motoru ŠKODA 1.2 HTP

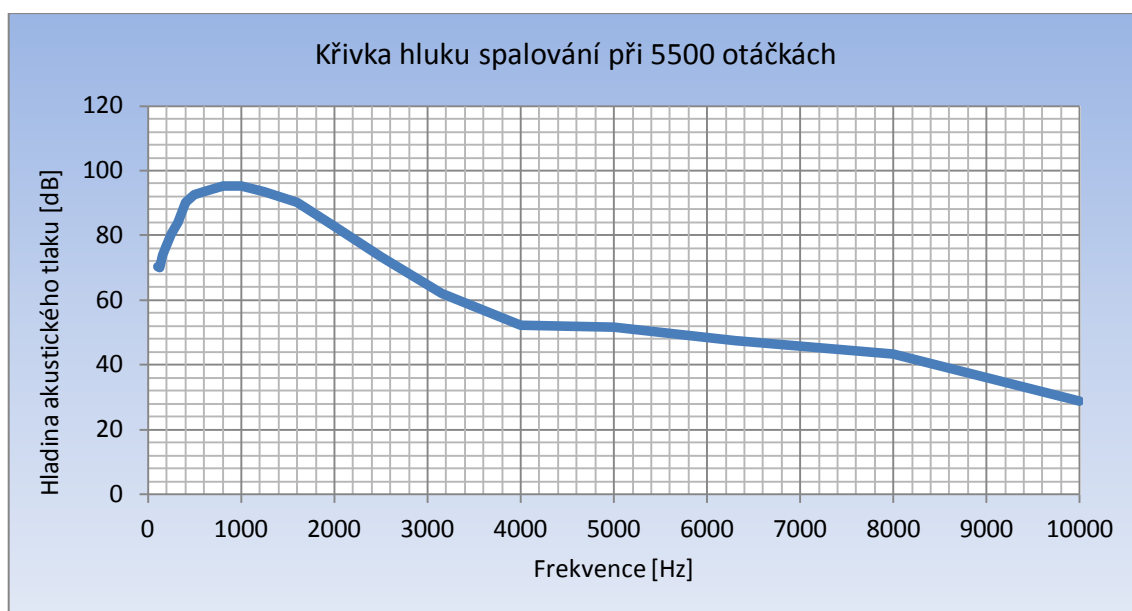
1. Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách



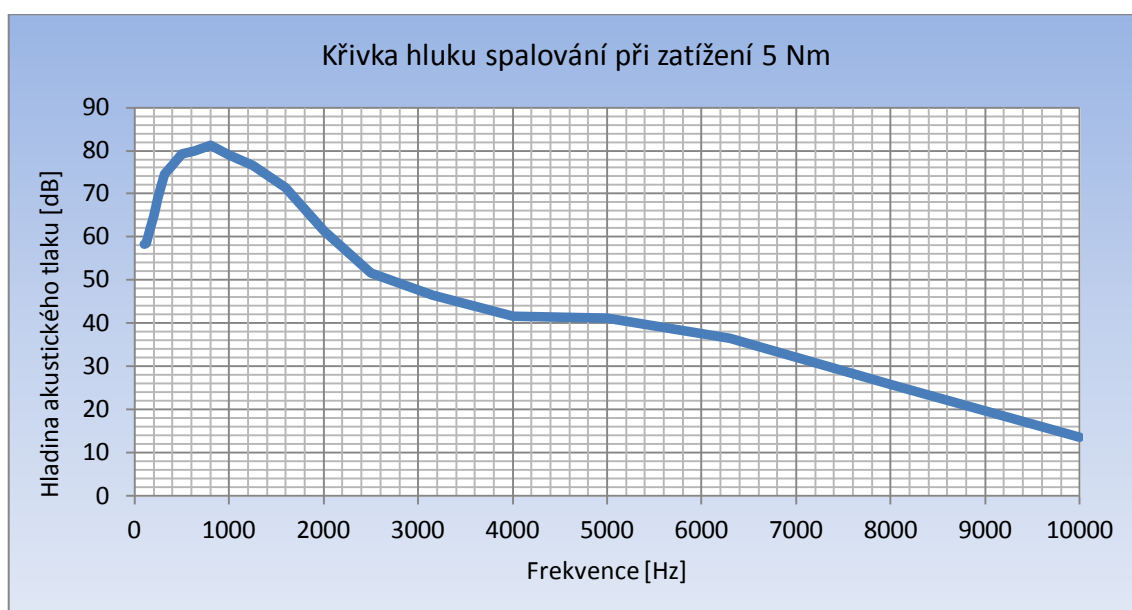


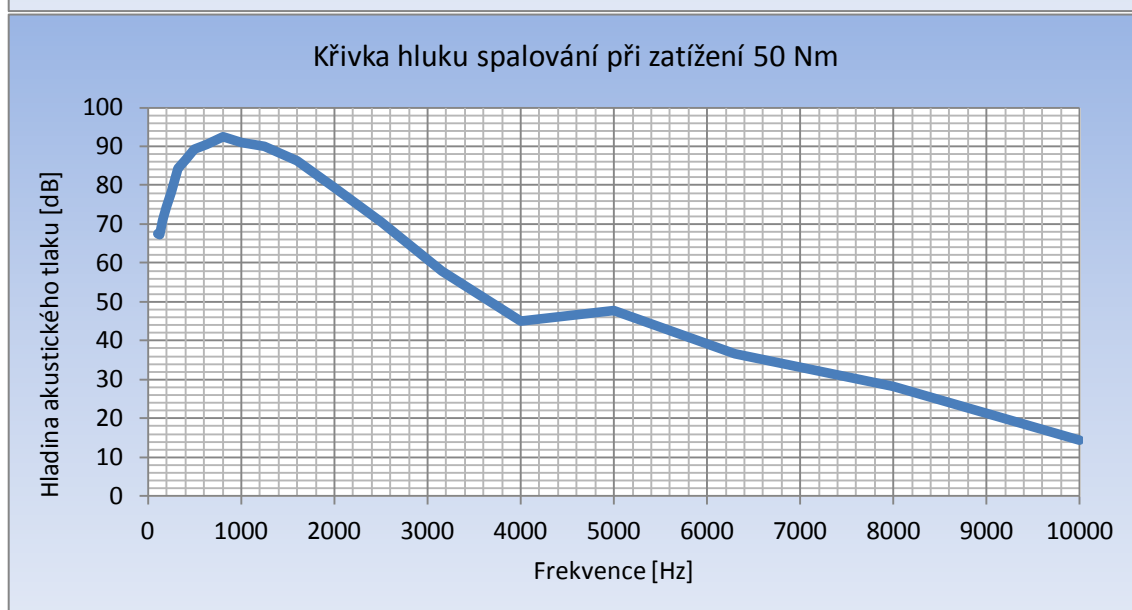
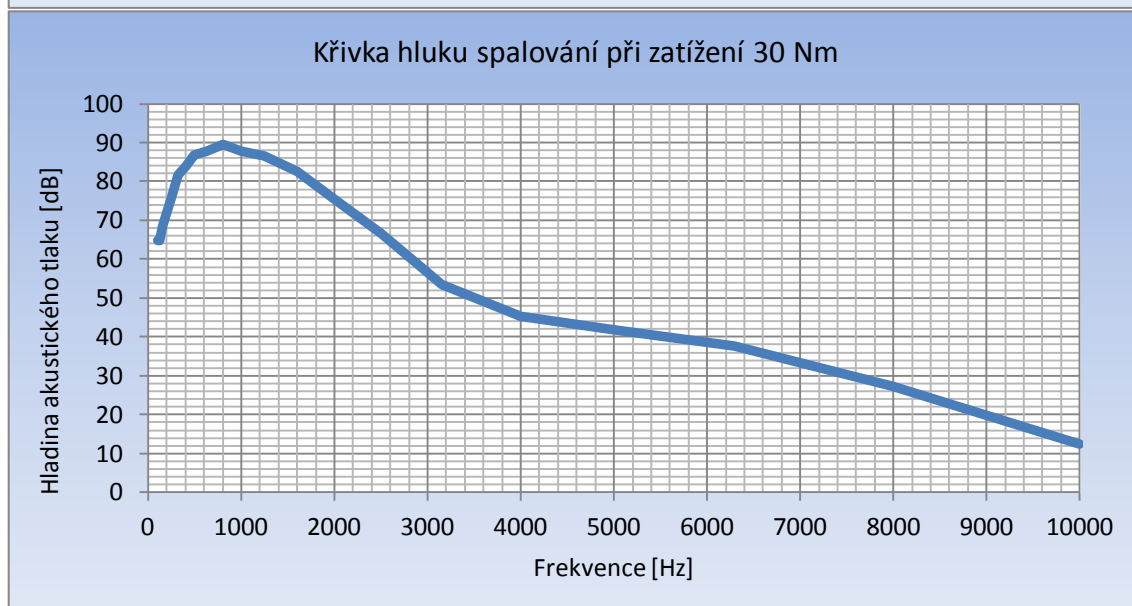
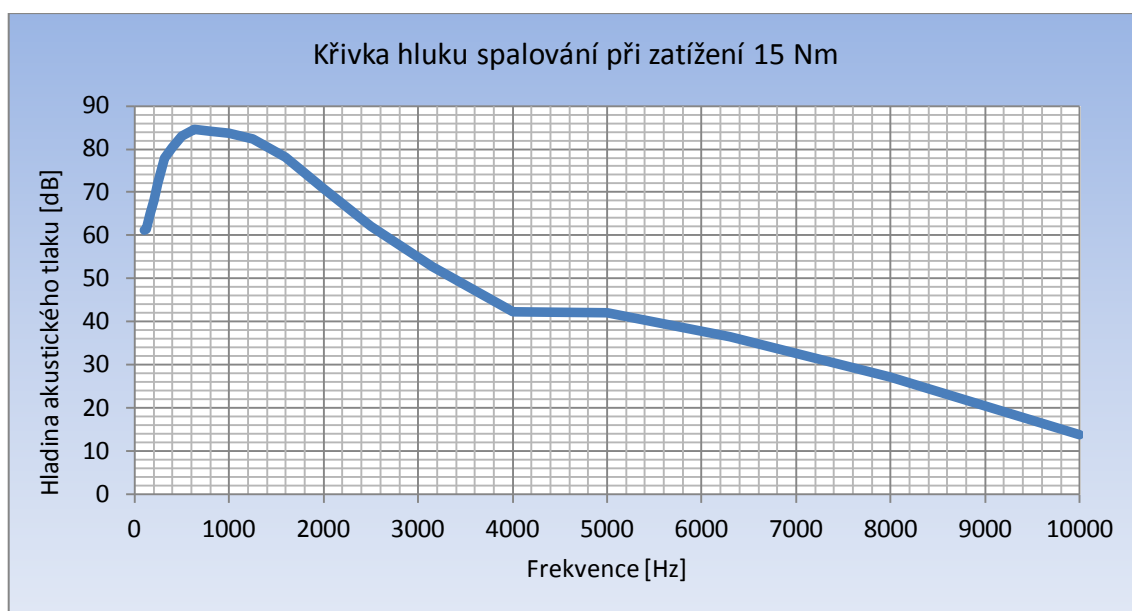


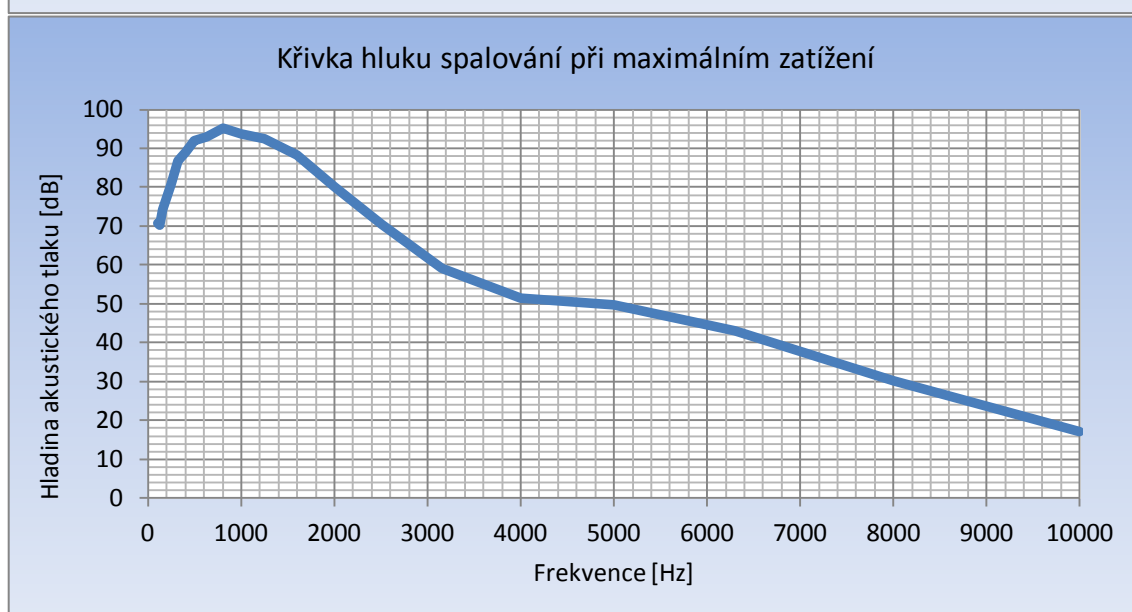
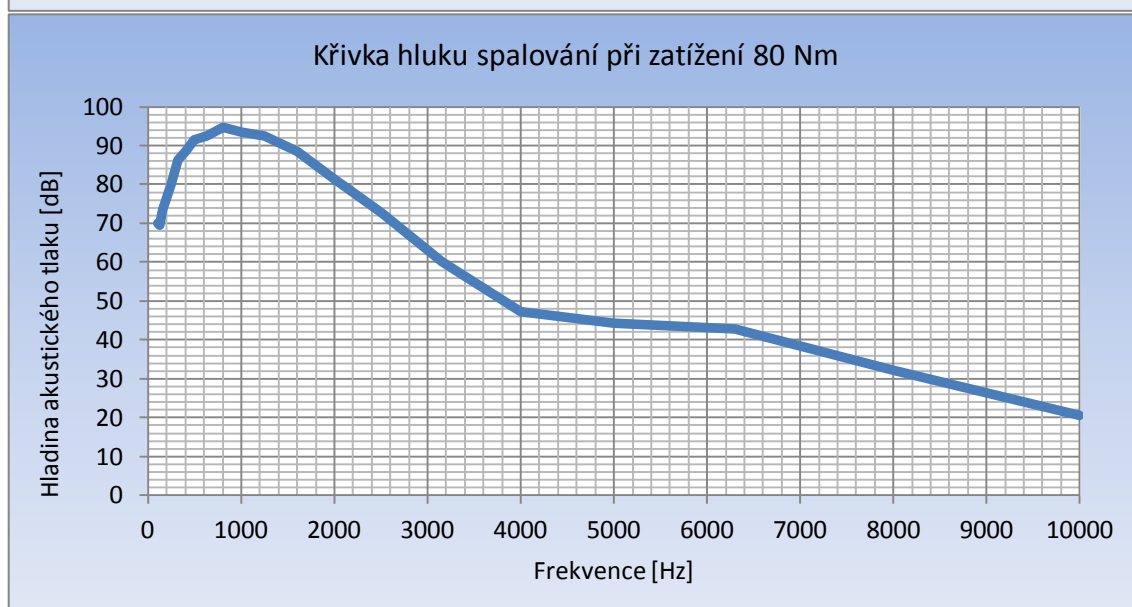
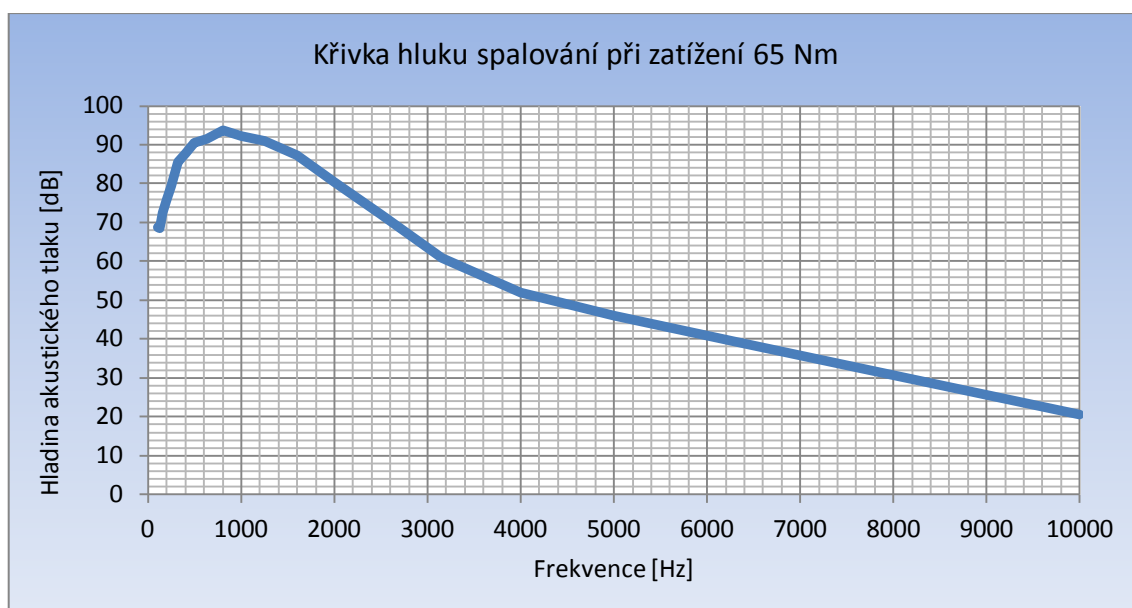




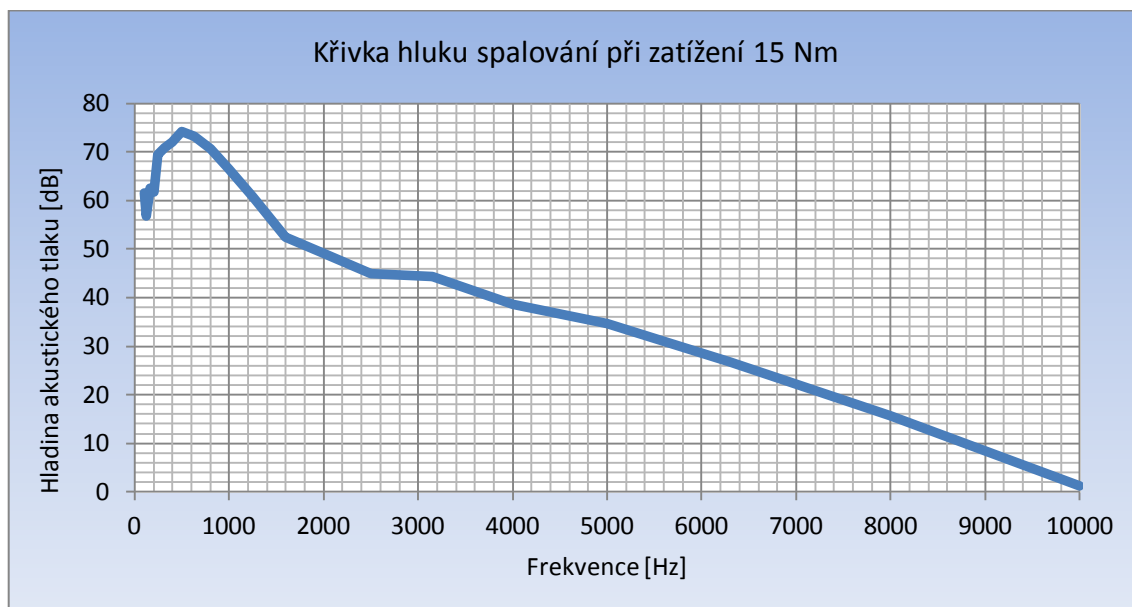
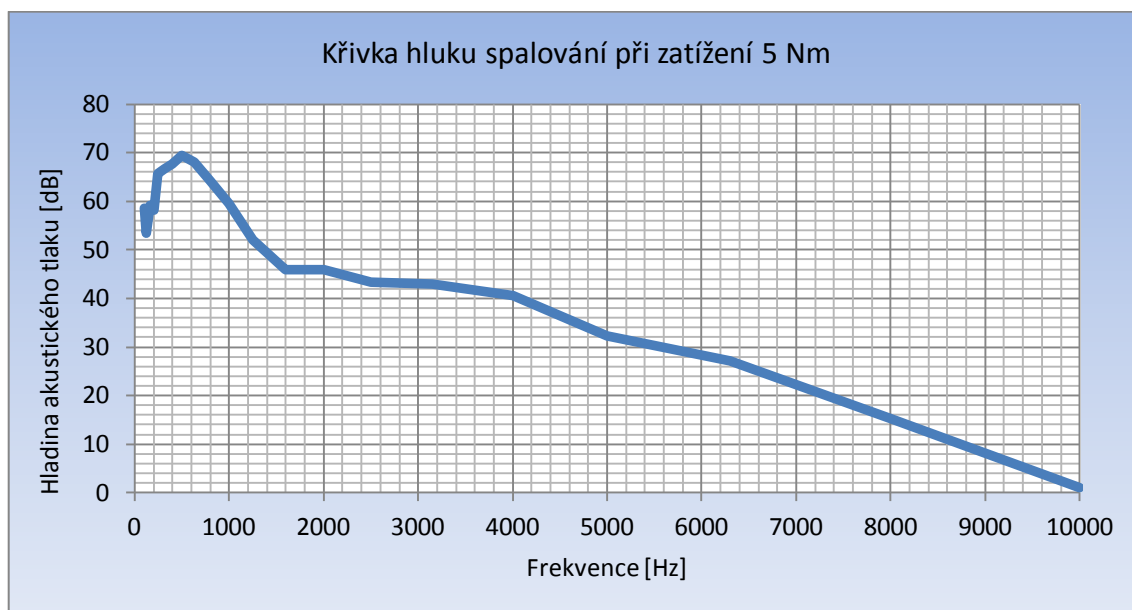
2. Měření hluku spalování při 5000 otáčkách a různém zatížení

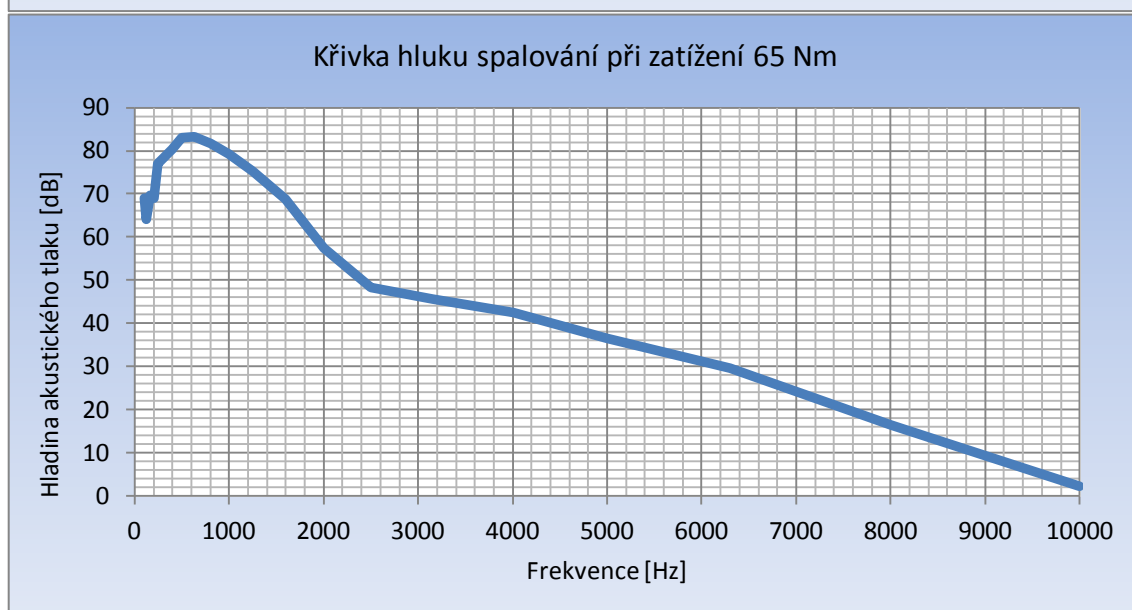
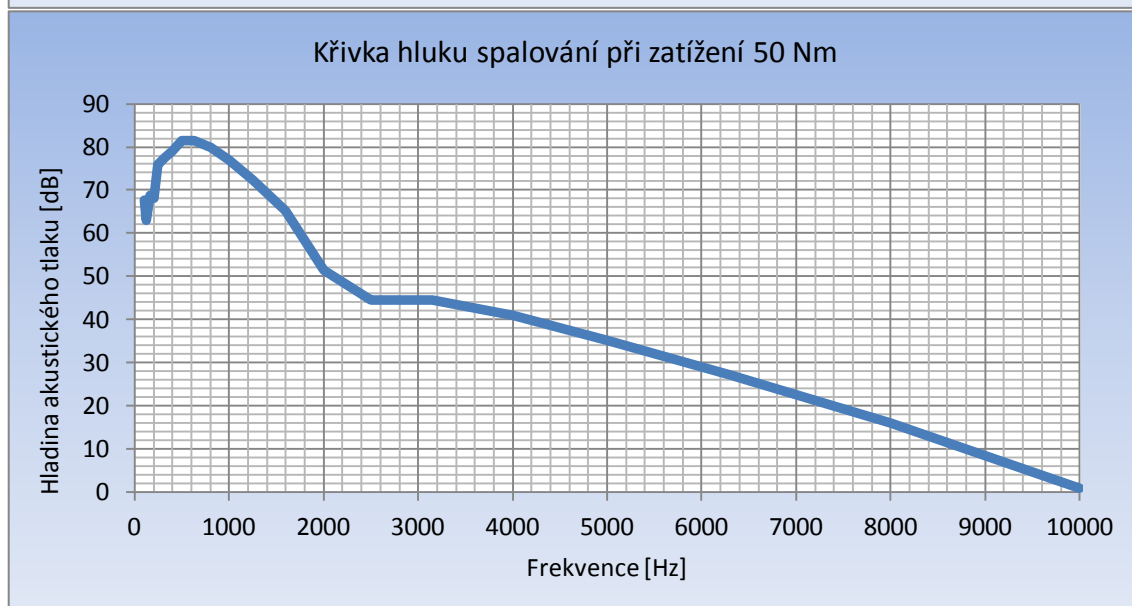
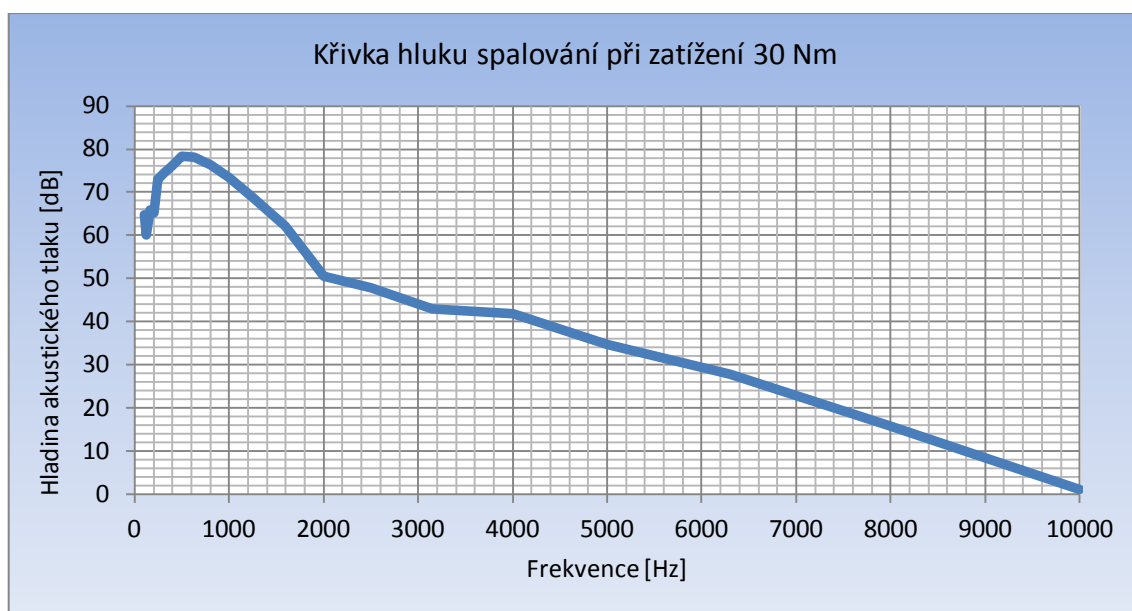


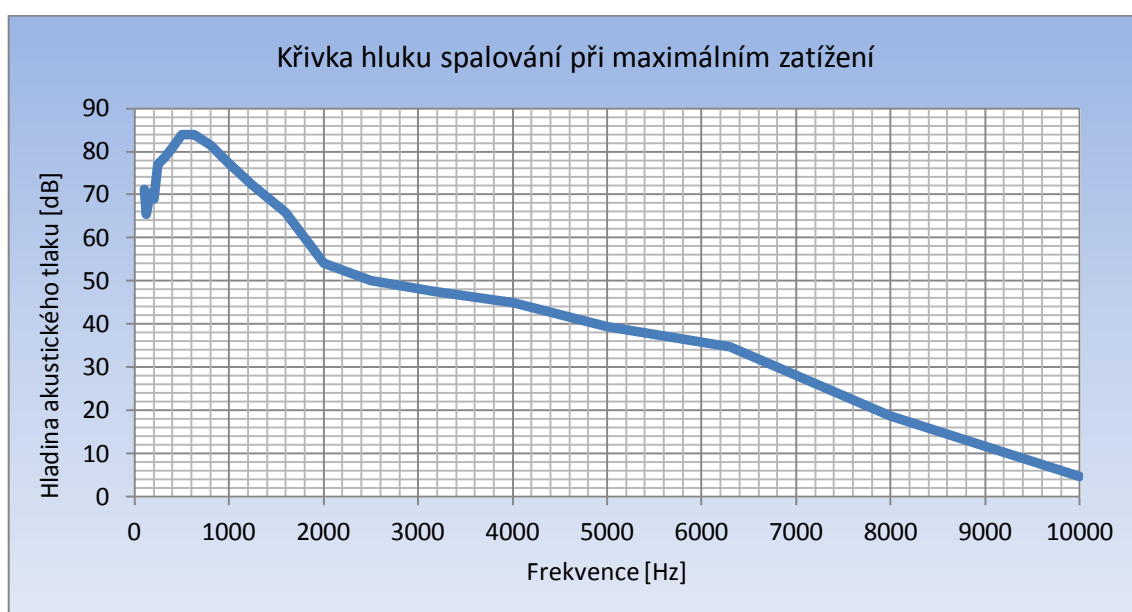
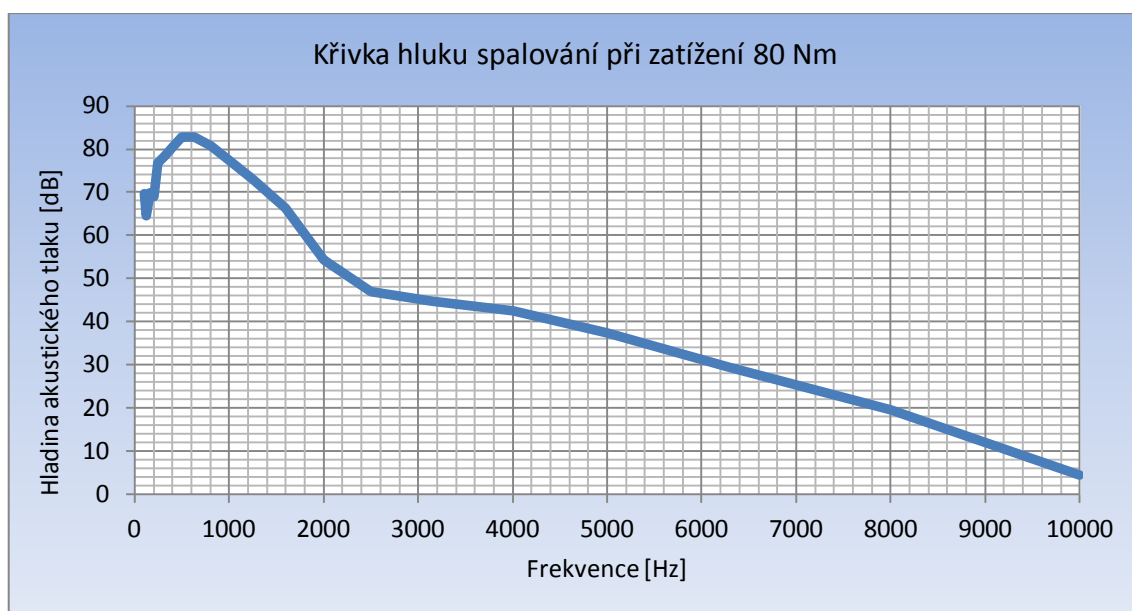




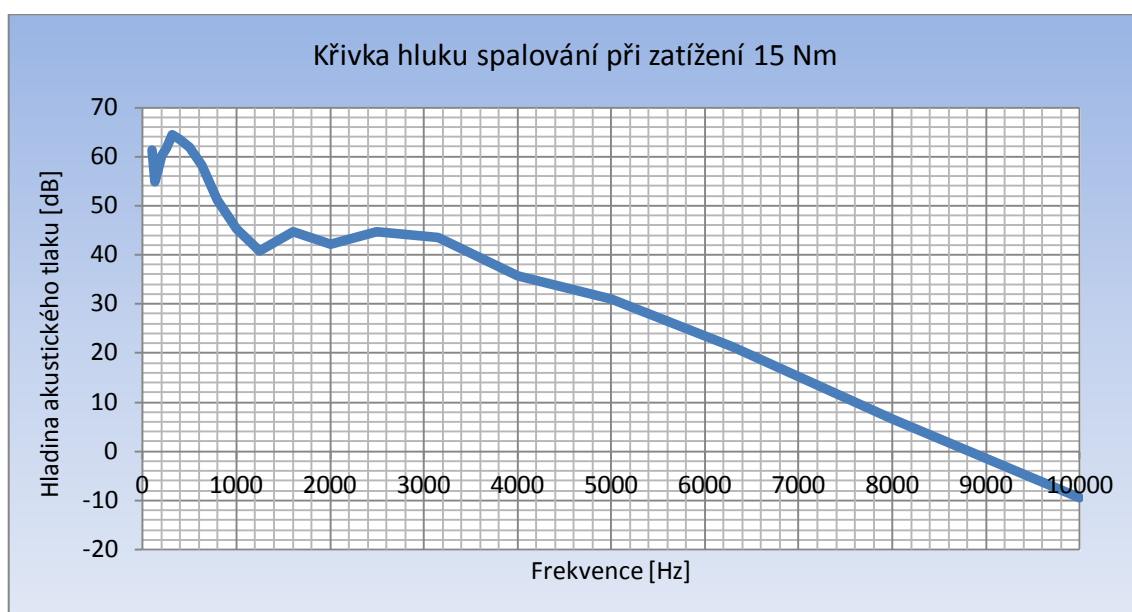
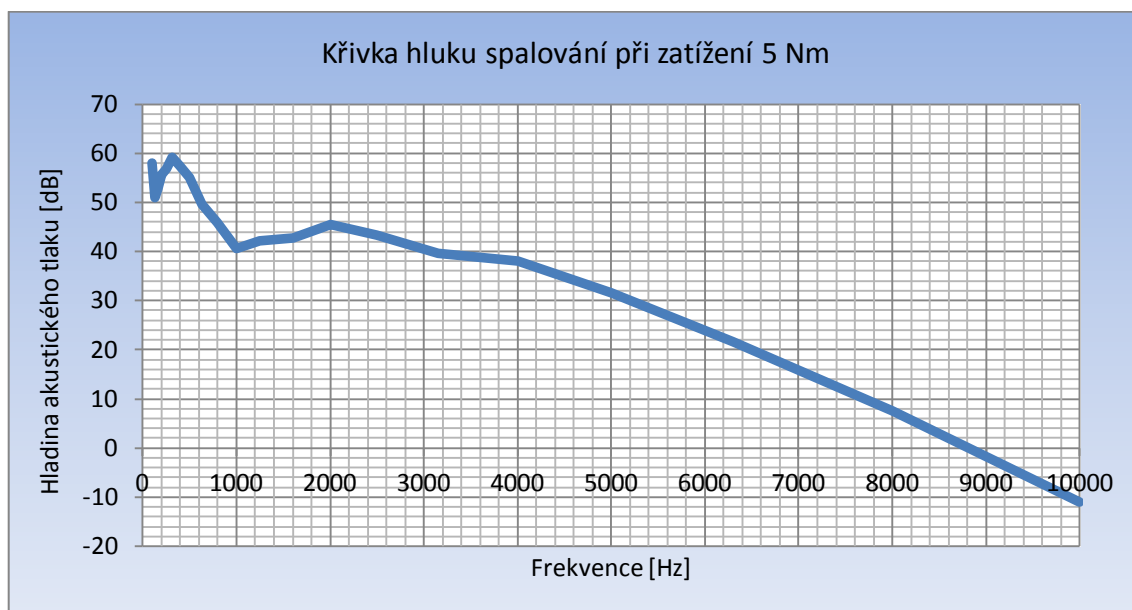
3. Měření hluku spalování při 3000 otáčkách a různém zatížení

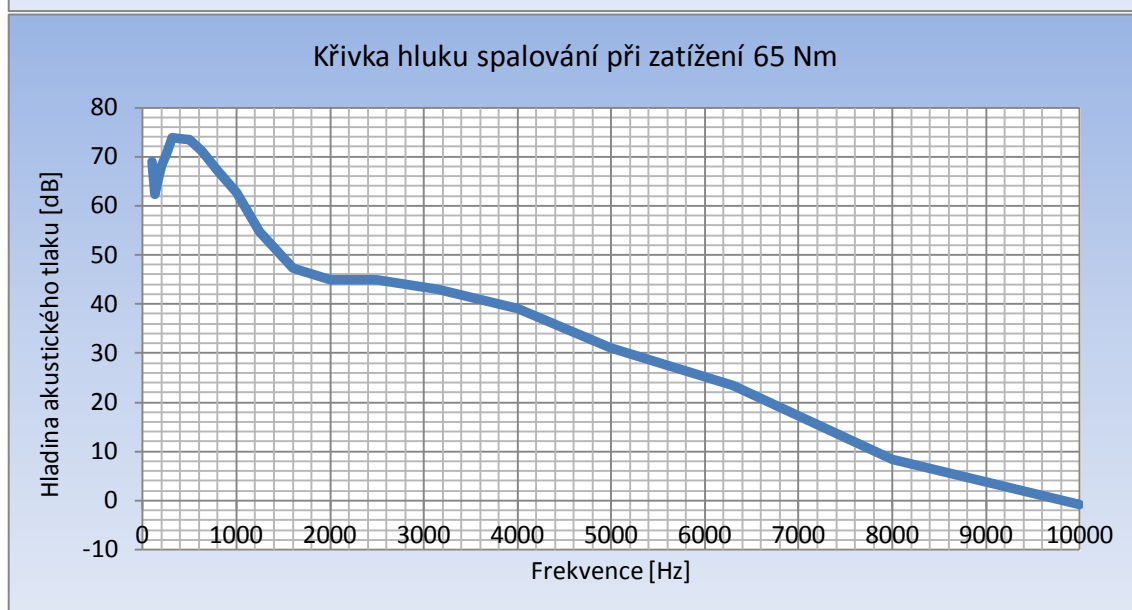
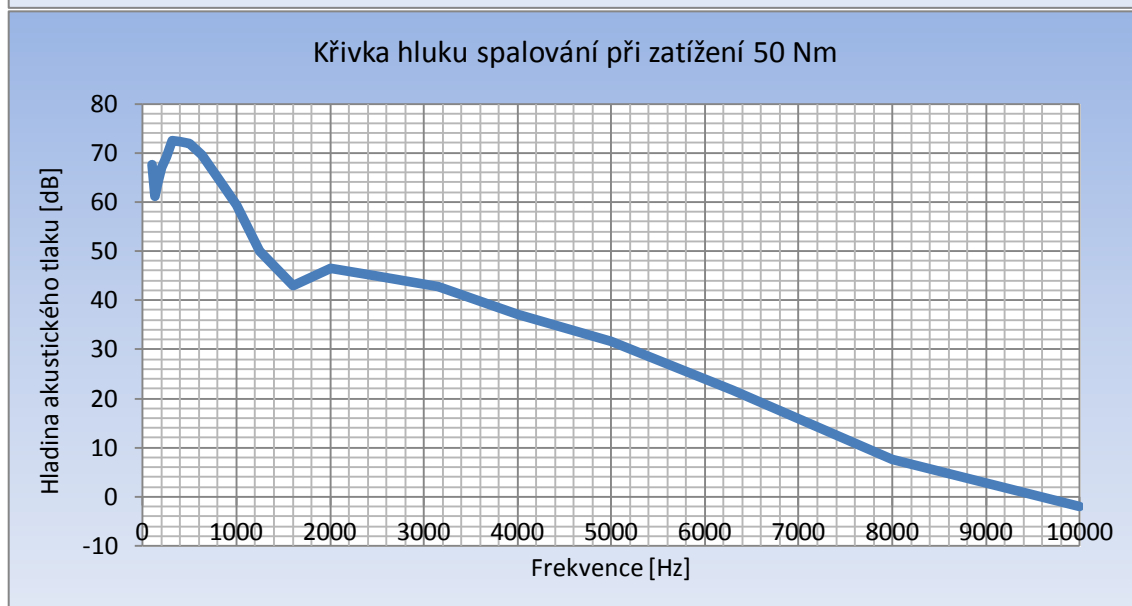
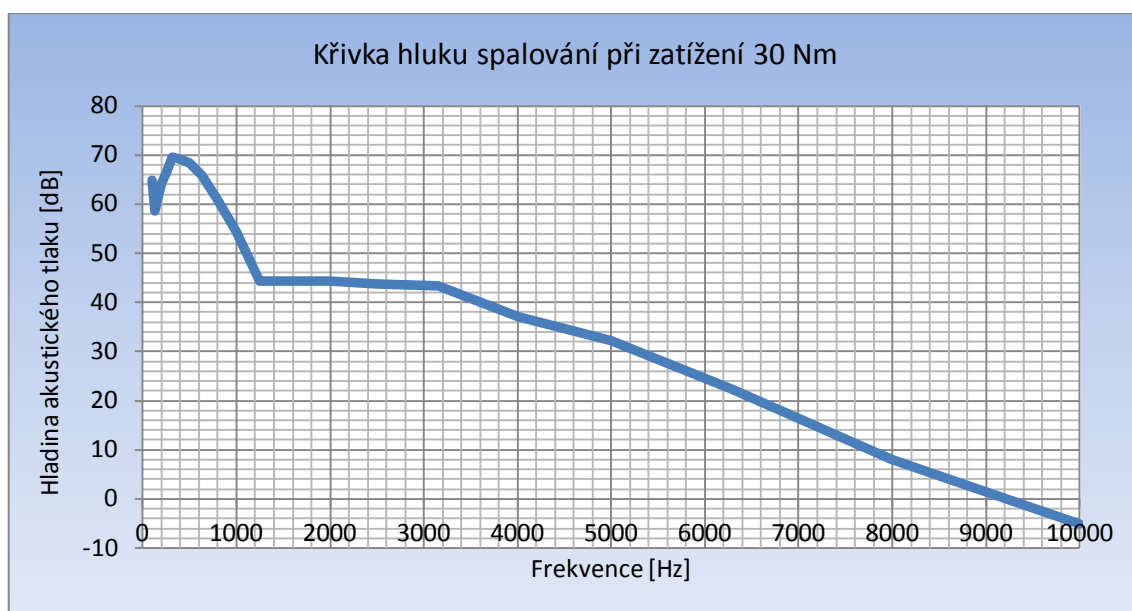


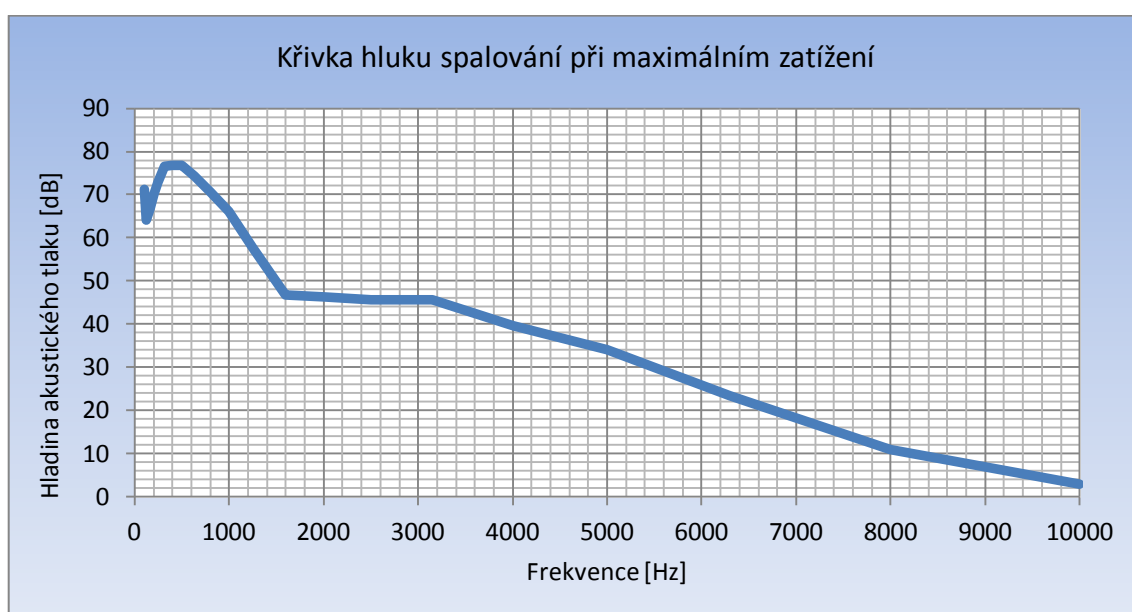
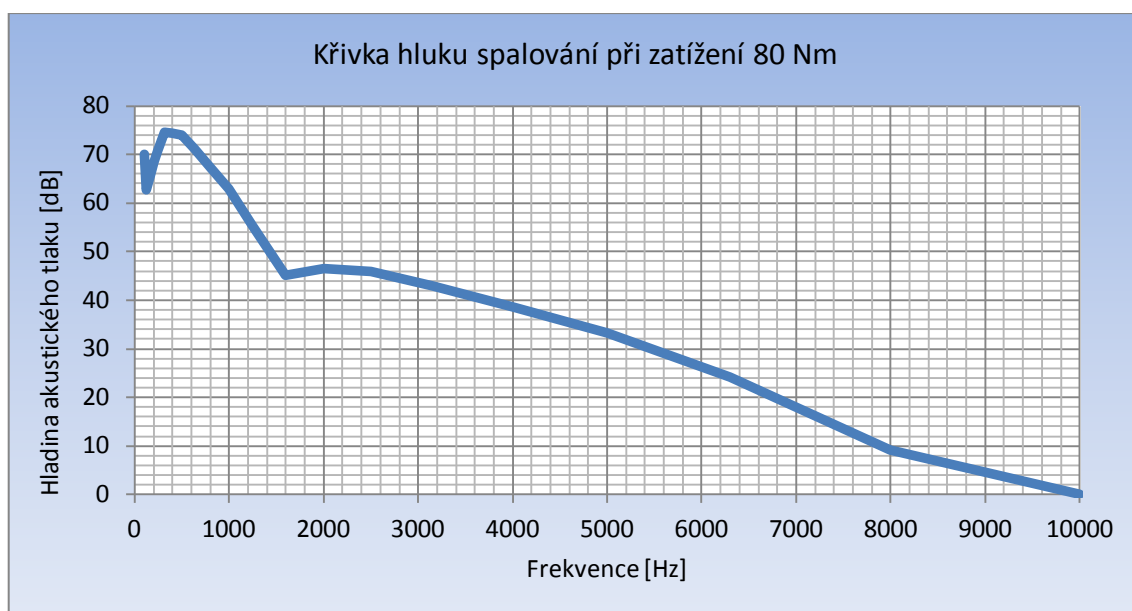




4. Měření hluku spalování při 2000 otáčkách a různém zatížení

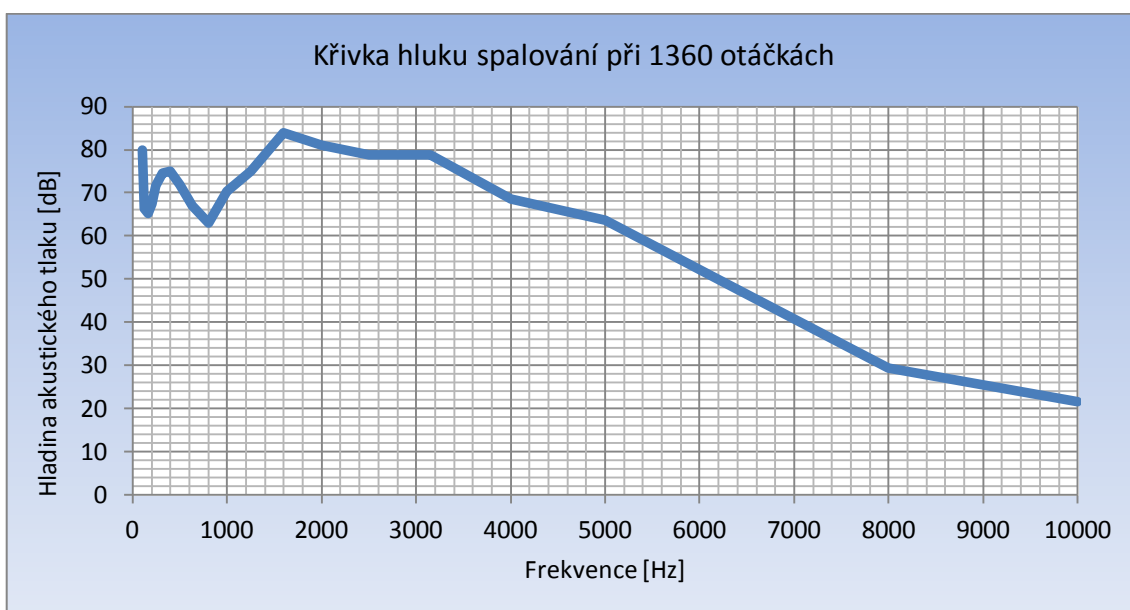
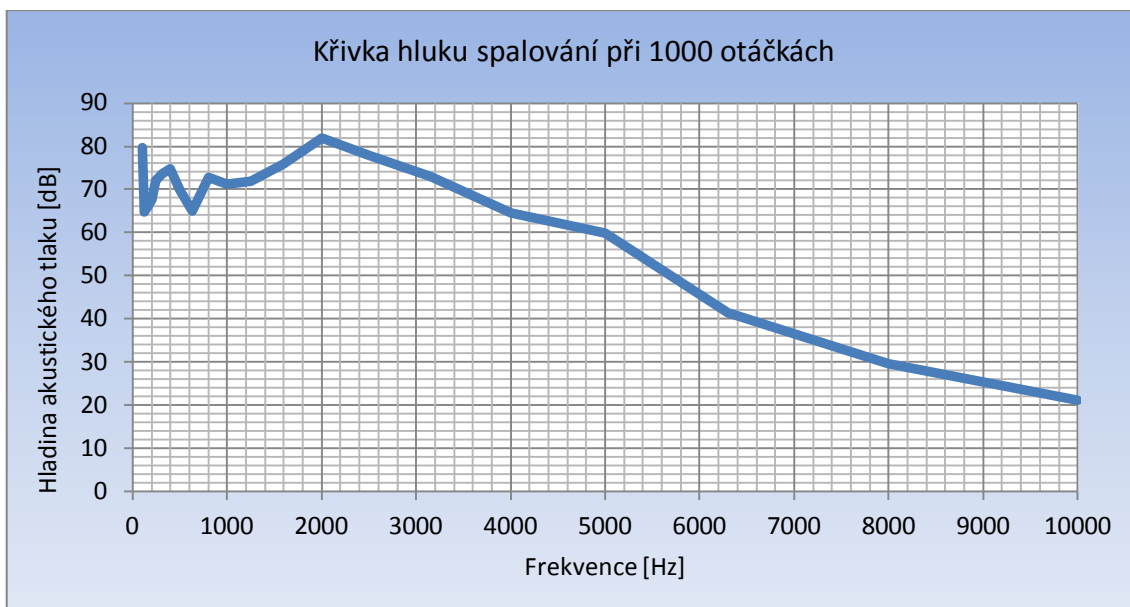


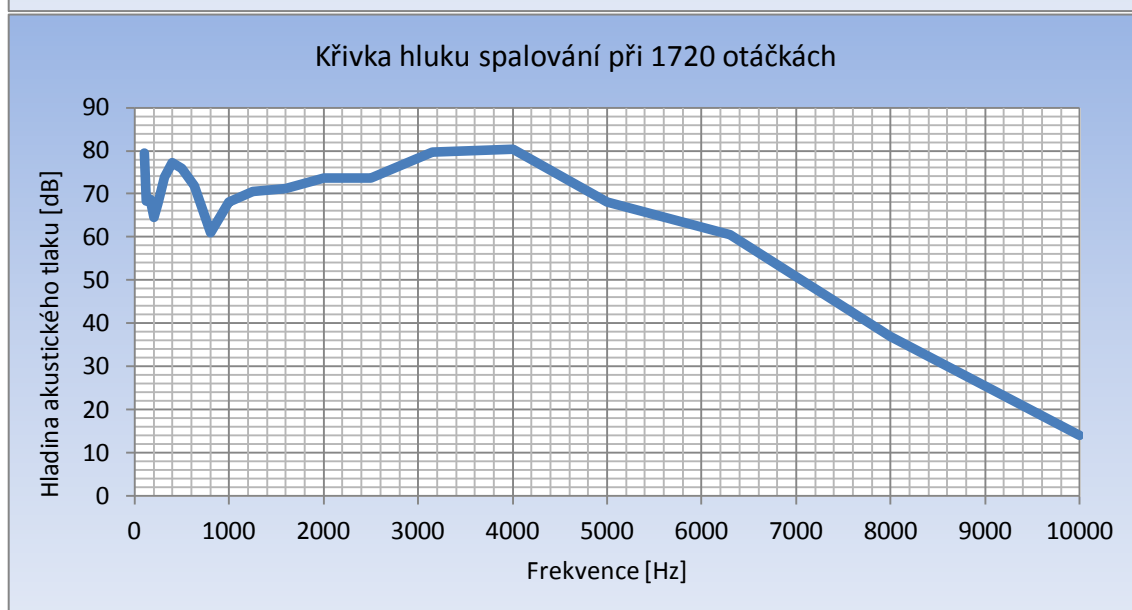
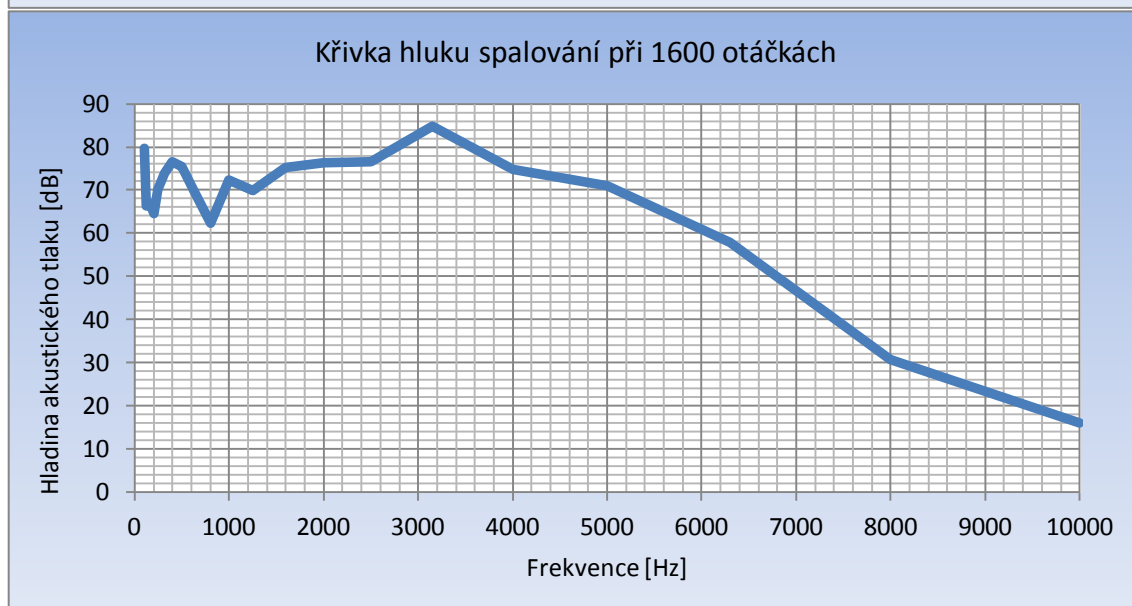
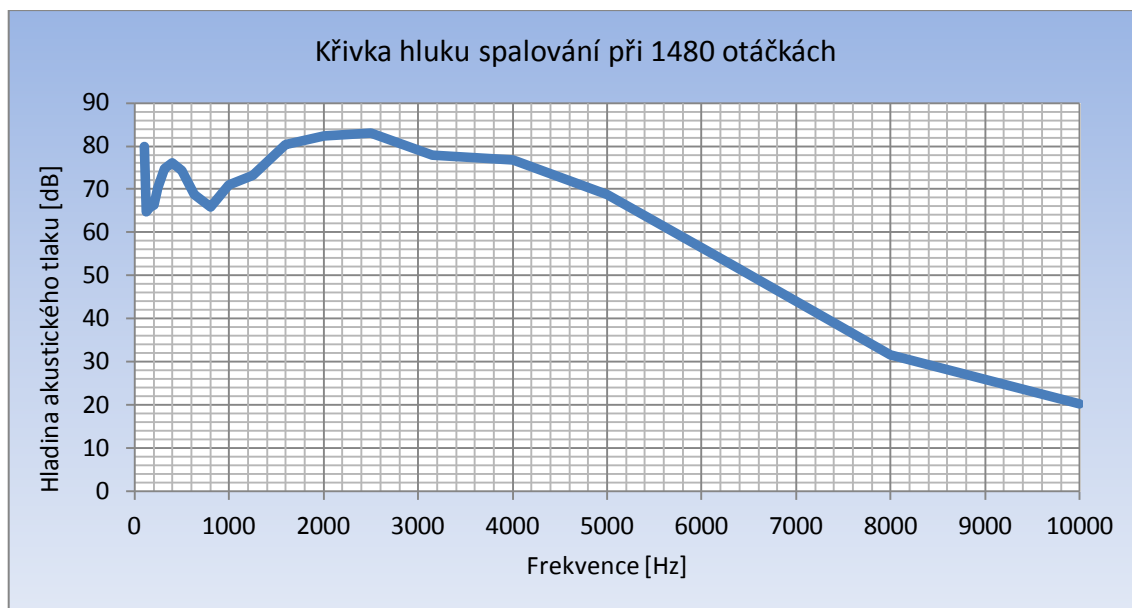


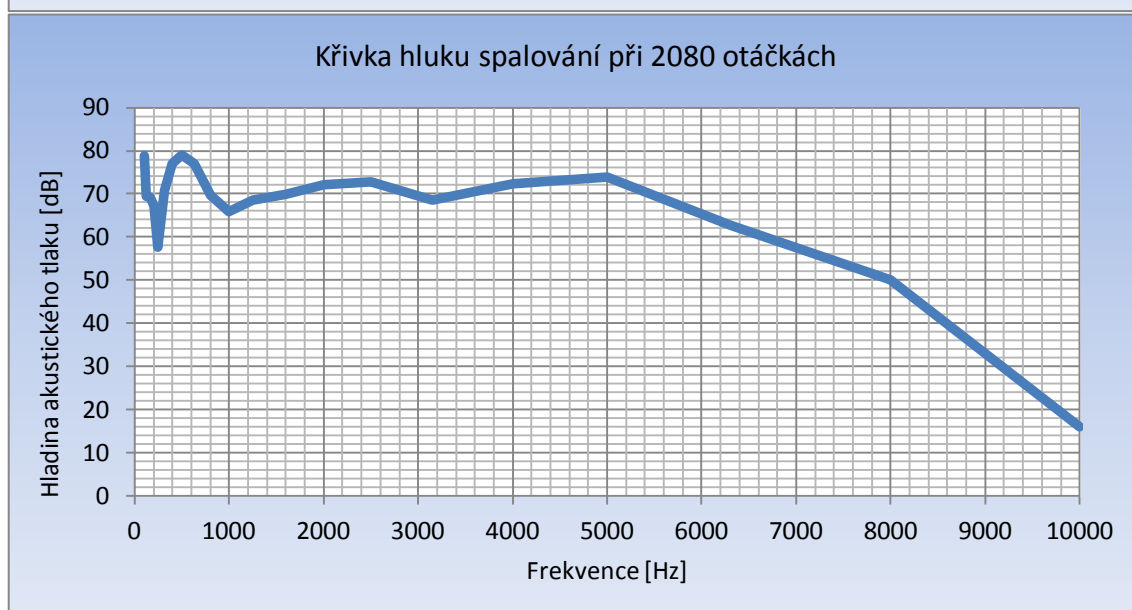
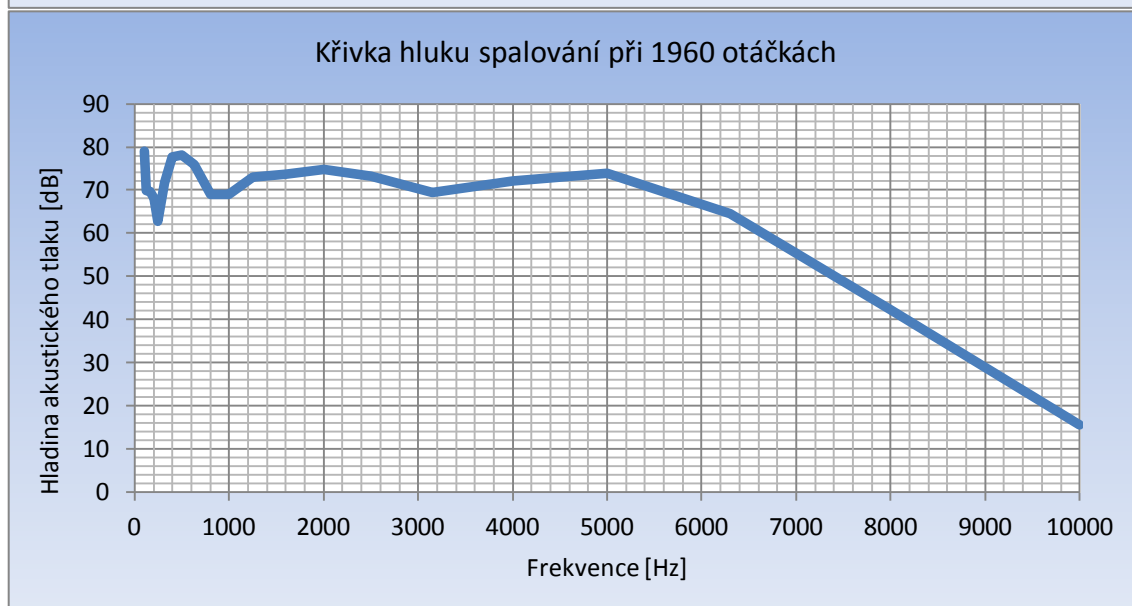
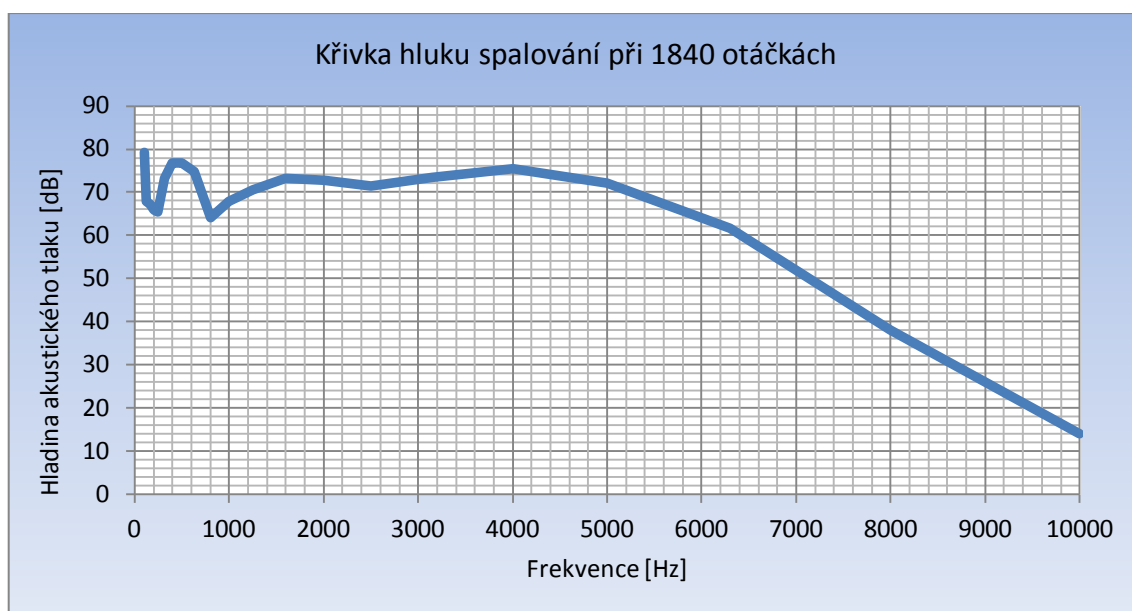


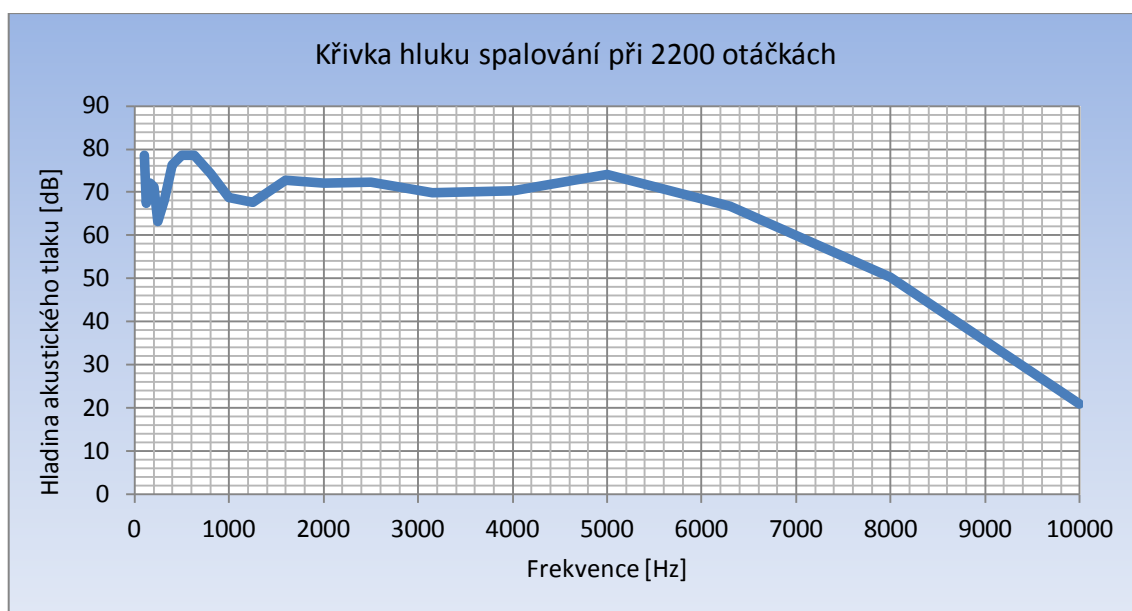
Příloha č. 2 Výsledky jednotlivých měření hluku spalování motoru ZETOR Z1505

1. Měření hluku spalování při maximálním zatížení a různých otáčkách

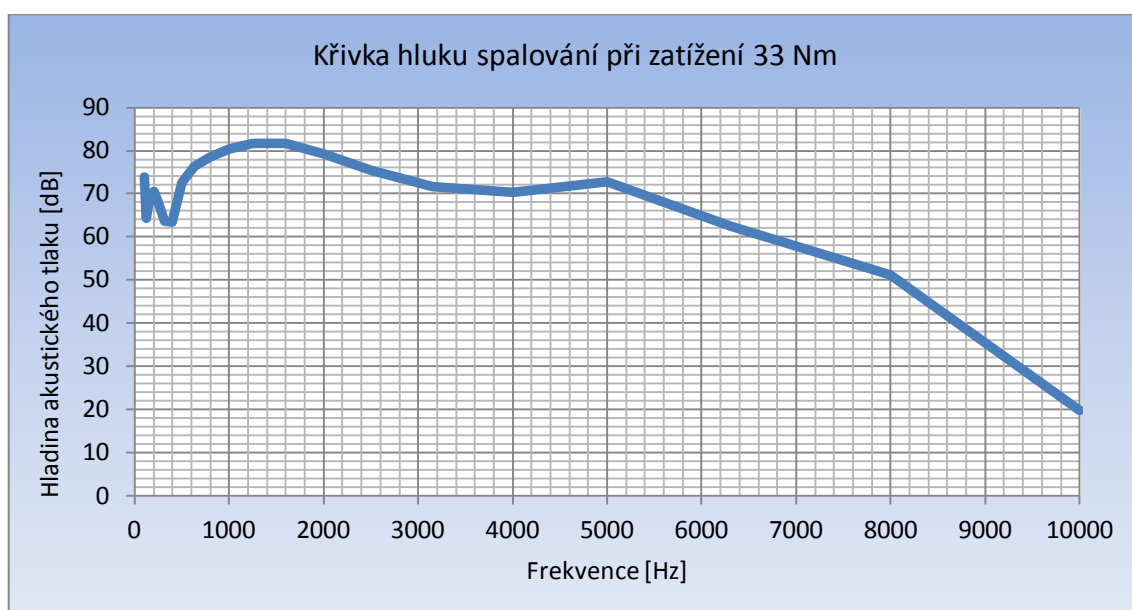


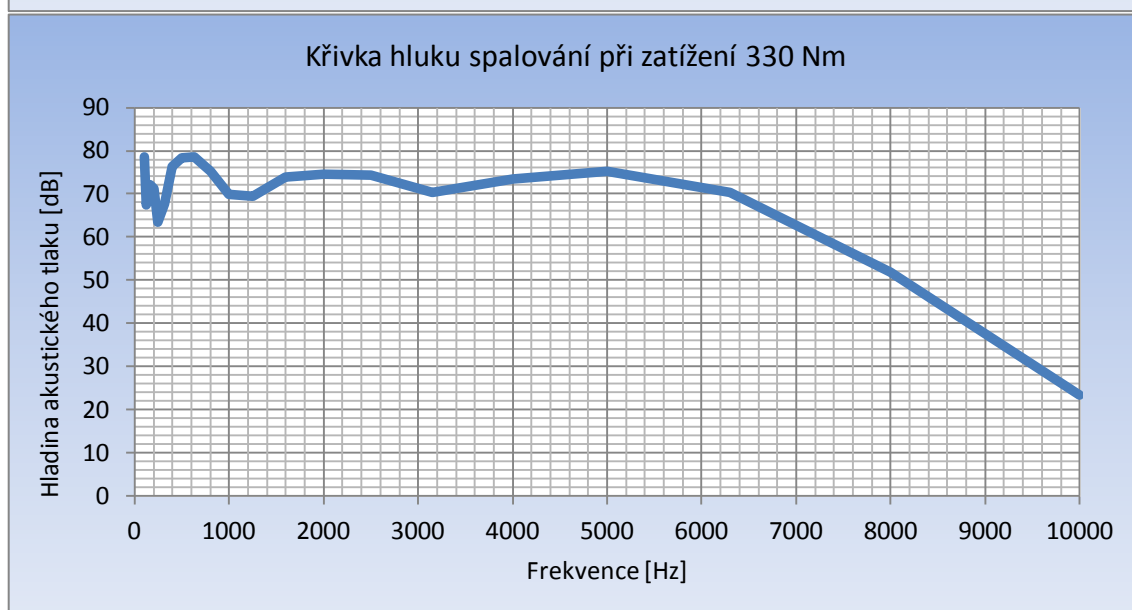
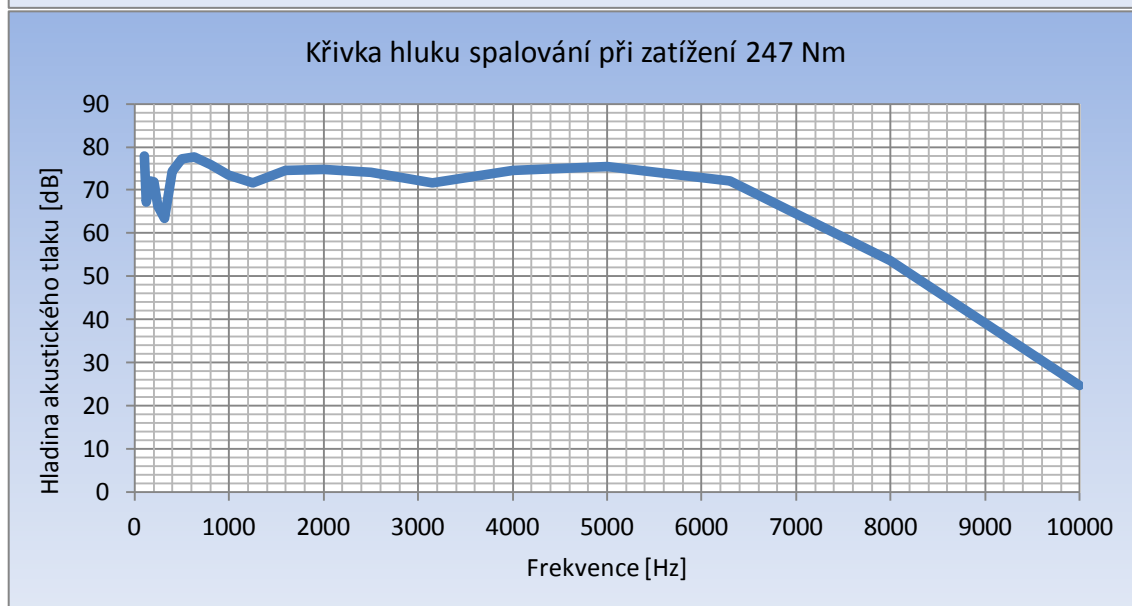
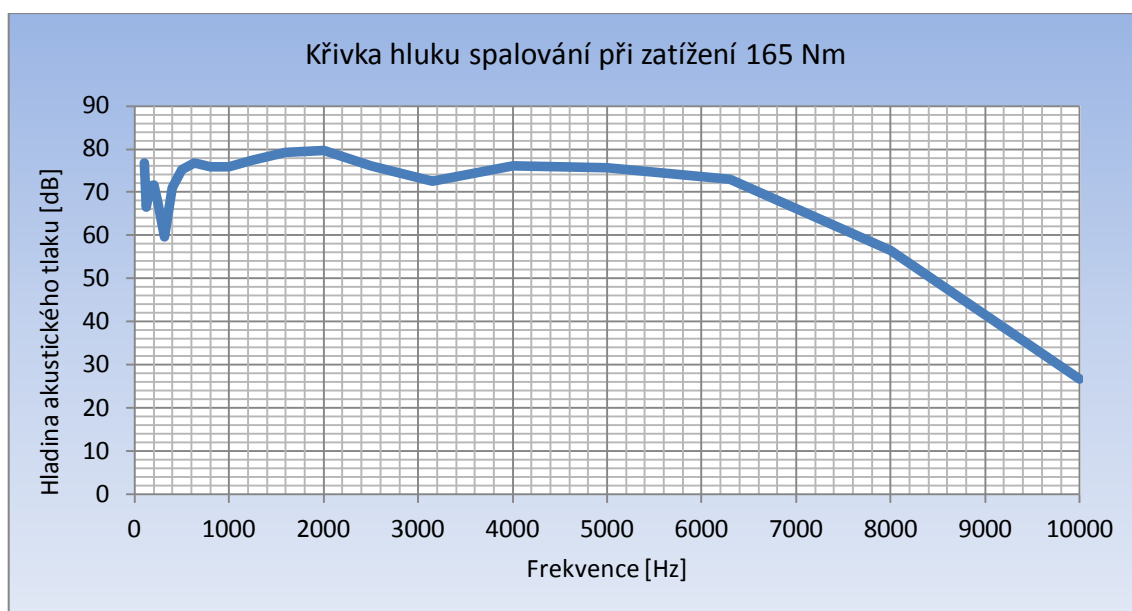






2. Měření hluku spalování při 2200 otáčkách a různém zatížení





3. Měření hluku spalování při 1480 otáčkách a různém zatížení

